

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

RAKENNUS- JA MAANMITTAUSTEKNIIKAN OSASTO

MAURI VALTA

KALLIOMURSKEEN KÄYTTÖ

VALMISBETONIN RUNKOAINEENA

Diplomityö, joka on jätetty opin-
näytteenä tarkastettavaksi diplomi-
insinöörin tutkintoa varten

Espoossa 24.11.1988

Työn valvoja: Prof. Vesa Penttala

Työn ohjaaja: Dipl.ins. Klaus Juvas

Tekijä ja työn nimi : Mauri Valta

Kalliomurskeen käyttö valmisbetonin runkoaineena

Päivämäärä : 24.11.1988

Sivumäärä : 98

Osasto : Rakennus- ja Maanmittaustekniikan osasto

Professuuri : Rak-82
Betonitekniikka

Työn valvoja : Professori Vesa Penttala

Työn ohjaaja : DI Klaus Juvas

Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia suomalaisesta peruskalliosta murskatun kiviaineksen käyttömahdollisuuksia yleisbetonien K20 ja K40 sekä huokostetun ja nesteytetyn betonin K40 runkoaineena. Työssä tarkasteltiin pääasiassa yhden murskaamon raemuodoltaan tavanomaisia lajitteita.

Kirjallisuusosassa selvitettiin lyhyesti kalliomurskeen jalostusprosessi sekä murskeen fysikaaliset ominaisuudet ja niiden vaikutus betonin ominaisuuksiin.

Kokeellinen osa jakaantui laboratorio- ja työmaakokeisiin. Laboratoriossa tutkittiin Karhulan kalliomurskeen määrän vaikutus betonin ominaisuuksiin ja todettiin murskeen käytön soveltuvan parhaiten korkeammille lujuusluokille. Betonin lujuuden kannalta murskeen optimimääräksi yleisbetoneissa saatiin 60 - 70 %. Työmaakokeissa selvitettiin parhaiden betonien käyttökelpoisuus paikallisia materiaaleja käyttäen.

Laboratoriokokeissa ei betonien puristuslujuuksissa havaittu suuria eroja raemuodoltaan erilaisia murskeita käytettäessä. Ainoastaan hyvin kulmikasta mursketta käyttäen jäi betonin lujuus alhaisemmaksi.

Murskemäärän kasvaessa nesteytetyn betonin puristuslujuus suureni, kun taas huokostetun betonin puristuslujuus pieneni ja huokostinannostus kasvoi.

Taloudellisin murskemäärä Karhulassa on nykyisillä kiviainesten hinnoilla noin 50 %.

Author and name of the thesis : Mauri Valta

Ready-mixed concrete with crushed aggregate

Date : 24.11.1988

Number of pages : 98

Department : Faculty of Civil Engineering and
Surveying

Professorship : Rak-82
Concrete
technology

Supervisor : Professor Vesa Penttala

Instructor : M.Sc (Civ.Eng.) Klaus Juvas

The aim of this study was to investigate the possibilities of using crushed aggregate in ready-mixed concrete. The study included four different types of concrete: ordinary - (the strength classes K20 and K40), air-entrained - (K40) and superplasticized (K40) concrete. Concerned is mainly one crushed typical Finnish aggregate in Karhula.

In the literature study the processing and the physical properties of crushed aggregate as well as their effects on the properties of concrete are dealt with briefly.

The experimental part divided into laboratory and site tests. The effects of the quantity of the Karhula crushed aggregate on the properties of concrete were studied in laboratory tests. Studies showed that the higher the strength class the better possibilities there are to use crushed aggregate. The optimum quantity of crushed aggregate seemed to be 60-70 % to obtain the highest strength of the ordinary concrete. In site tests the properties of concrete made with crushed aggregate and local materials were studied in practice.

No significant differences could be observed in strength levels when using different shapes of crushed particles. Merely with particles of very angular form the compressive strength was lower.

When the quantity of crushed aggregate increased, the strength of superplasticized concrete became higher, whereas the strength of air-entrained concrete decreased and the amount of air-entraining agent increased. Today the most economical quantity of crushed aggregate in Karhula is about 50 %.

ALKULAUSE

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää kallio-
murskeen käyttömahdollisuuksia valmisbetonin runko-
aineena. Tutkimus on tehty Oy Partek Ab:n toimeksian-
nosta, joka on myös vastannut kaikista työhöni liittyvistä
kustannuksista.

Laboratoriokokeet suoritettiin Partekin Kehityskeskuksen
betonilaboratoriossa ja työmaakokeet Karhulan valmis-
betonitehtaalla, joiden henkilökunnalle suuri kiitos
työni avustuksesta. Laborantti Kari Kotilaista haluan
erityisesti muistaa positiivisesta asenteesta tutkimus-
työtäni kohtaan.

Työni valvonnasta haluan esittää kiitokseni professori
Vesa Penttalalle sekä ohjauksesta dipl.ins. Klaus
Juvakselle, joka on antanut mahdollisuuden itsenäiseen
työskentelyyn hyvän keskinäisen luottamuksen vallitessa.

Mauri Valtio

SISÄLLYSLUETTELO

Sivu

KIRJALLISUUSOSA

0.	JOHDANTO	1
1.	SUOMEN KALLIOPERÄ JA SEN KIVILAJIEN SOVELTUVUUS BETONIN RUNKOAINEEKSI	3
2.	KIVIAINEKSEN JALOSTUS KALLIOMURSKEEKSI	5
3.	KALLIOMURSKEEN OMINAISUUDET	8
3.1	Raemuoto	9
3.2	Puhtaus	12
3.3	Muut ominaisuudet	13
4.	KALLIOMURSKEEN VAIKUTUS TUOREEN BETONIN OMINAISUUKSIIN	15
4.1	Notkeus ja vedentarve	16
4.2	Työstettävyyys	18
4.3	Pumpattavuus	19
5.	KALLIOMURSKEEN VAIKUTUS KOVETTUNEEN BETONIN OMINAISUUKSIIN	22
5.1	Lujuus	22
5.2	Kutistuma	25
5.3	Pakkasenkestävyys	27
6.	KIVITUHKAN VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN	28

KOKEELLINEN OSA

7.	TUTKIMUSOHJELMA	30
8.	LABORATORIOKOKKEET	32
8.1	Materiaalitiedot	32
8.2	Betonimassan valmistus ja massakokeet	35
8.3	Koekappaleiden valmistus, säilytys ja testaus	36
9.	TYÖMAAKOKEET	37
9.1	Materiaalitiedot	37
9.2	Betonikokeet	39
9.3	Rakennelujuus Break-off laitteella	41

10. NORMAALIT YLEISBETONIT	44
10.1 Yleisbetonin suhteitustiedot	44
10.2 Yleisbetonin laboratorionkokeiden tulokset	47
10.2.1 Runkoainekokeet	48
10.2.2 Betonimassan ominaisuudet	49
10.2.3 Kovettuneen betonin ominaisuudet	52
10.3 Yleisbetonien työmaakokeiden tulokset	54
10.4 Yleisbetonien koetulosten tarkastelu	56
10.4.1 Runkoainekokeet	56
10.4.2 Betonimassakokeet	57
10.4.3 Kovettuneen betonin kokeet	62
10.5 Muilla murskeilla tehdyt kokeet	
11. NESTEYTETTY BETONI	72
11.1 Suhteitustiedot	72
11.2 Nesteytetyn betonin koetulokset	73
11.3 Nesteytetyn betonin koetulosten tarkastelu	75
12. HUOKOSTETTU BETONI	80
12.1 Suhteitustiedot	80
12.2 Huokostetun betonin koetulokset	81
12.3 Huokostetun betonin koetulosten tarkastelu	82
13. MURSKEMASSOJEN PUMPATTAVUUS	87
14. TALOUDELLISUUSVERTAILU	90
15. YHTEENVETO	93

KIRJALLISUUSLUETTELO

LIITTEET 1 - 8

1. INTENSIVE COMPACTION -tutkimuslaite
2. BREAK-OFF laite
3. Yleisbetonien suhteitustiedot laboratorionkokeissa
4. Työmaakokeiden suhteitustiedot
5. Yleisbetonien koetulokset laboratorionkokeissa
6. Työmaakokeiden koetulokset
7. Lisäainebetonien suhteitustiedot laboratorionkokeissa
8. Lisäainebetonien koetulokset laboratorionkokeissa

0. JOHDANTO

Maamme kiviainesvarat ovat huomattavasti suuremmat ja laadultaan paremmat kuin useimmissa muissa Euroopan maissa. Kuitenkin kiviainesten riittävyys ja taloudellinen saatavuus on muodostunut ongelmalliseksi Etelä-Suomessa erityisesti pääkaupunkiseudulla. Tämä on seurausta toisaalta ympäristösuojelullisista toimenpiteistä, toisaalta kiviainesvarantojemme epätasaisesta jakautumisesta. Esimerkiksi Uudellamaalla on pulaa karkeasta harjukiviaineksesta ja pääkaupunkiseutua sen loppuminen uhkaa jo lähimmän viiden vuoden kuluessa Tie- ja vesirakennuslaitoksen teettämän selvityksen mukaan. Erityisesti lajitteesta 4 - 8 mm on pulaa, kun taas hienoa hiekkaa 0 - 2 mm on ylimäärin saatavissa.

Pääkaupunkiseudulla on hiekan ja soran keskimääräinen kuljetusmatka nykyisellään noin 50 km ja sen on arveltu kasvavan vähintään kilometrin vuodessa. Harjusorapohjaisen kiviaineksen pitkien kuljetusmatkojen nostama materiaalihinta lankeaa ensimmäisenä betoniteollisuuden maksettavaksi, sillä se asettaa käyttämälleen soralle suurimmat laatuvaatimukset.

Rannikkoseudulla vaihtoehdoksi on esitetty merisoran hyväksikäyttöä, mutta sen käyttö rajoittunee rannoille, jolloin maakuljetuskustannuksilta välttytään. Soran noston ja käsittelyn kustannuksista ei kuitenkaan ole riittävästi tietoa saatavissa.

Kalliorakentamisen jatkuvasti lisääntyessä louhintamurskeen käyttö harjuaineeksia korvaavana materiaalina on kasvanut merkittävästi.

Uudenmaan läänin maa-aineshuoltoselvityksessä on todettu, että louhintakustannukset vastaavat noin 30 kilometrin luonnonsoran kuljetuskustannuksia. Esimerkiksi 10...15 km etäisyydellä olevan kallioalueen käyttö on kustannuksiltaan kilpailukykyinen 50...60 km päässä olevan sora-alueen kanssa.

Etsittäessä betonin runkoaineeksi tavanomaista taloudellisempaa ratkaisua, voidaan eräänä keinona käyttää myös epäjatkuvarakeista runkoainetta. Tällöin käytetään ainoastaan helposti saatavissa olevia runkoainelajitteita ja jätetään kalliimpien vaikeasti saatavissa olevien lajitteiden kohdalle epäjatkuvuusaukko.

Tutkimuksessa etsittiin ratkaisua luonnon kiviainespulaan käyttämällä betonin runkoaineena kalliomursketta eli kalliosta murskattuja raemuodoltaan täysin kulmikkaita lajitteita. Tavoitteena oli selvittää kirjallisuustutkimuksen sekä kokeiden avulla murskeen määrän ja laadun vaikutusta valmisbetonin ominaisuuksiin. Kokeet tehtiin Oy Partek Ab:n kehityskeskuksessa sekä Karhulan valmisbetonitehtaalla.

1. SUOMEN KALLIOPERÄ JA SEN KIVILAJIEN SOVELTUVUUS BETONIN RUNKOAINEEKSI

Geologisilla kallioperäkartoilla pääosa Suomen kallioperästä on merkitty kuuluvan noin 1800 miljoonaa vuotta vanhaan peruskallioalueeseen. Kallioperämme ei kuitenkaan ole monotoninen, vaan kivilajien iässä, alkuperässä, mineralogisessa koostumuksessa ja metamorfoosissa eli kiteytymisasteessa voidaan havaita selviä vaihteluja. Syntytapansa perusteella tärkeimmät kivilajimme luokitellaan syväkivilajeihin ja metamorfisiin kivilajeihin eli kiteisiin liuskeisiin, jotka molemmat kattavat lähes 50 prosenttia Suomen kivilajeista. Lisäksi tavataan paikallisesti peruskalliota nuorempia sedimenttikivilajeja /15, 30/.

Kivilajien rakennustekniset ominaisuudet määräytyvät niiden vallitsevina olevien kiteisissä olomuodoissa esiintyvien mineraalien ominaisuuksien pohjalta. Tärkeimmät ominaisuudet ovat kivilajin lujuus, kovuus, sitkeys sekä kulutuksenkestävyys. Suomen kallioperän yleisimpien kivilajien puristuslujuudet ovat riittävän suuria jopa korkealuokkaisen betonin runkoaineeksi käytettäväksi (taulukko 1). Mekaanisesti heikompia aineksia, pääasiassa kiilteitä esiintyy joissain määrin.

Kivilajien huokoisuus on käytännössä merkityksetöntä ja rapautuneisuus vähäistä keskittyen pääasiassa Pohjois-Suomen rapakallioalueisiin. Betonin rapautumista aiheuttavat rikkipitoiset sulfidimineraalit, esimerkiksi magneettikiisu sulfaattikorroosiona. Tätä betonin korroosio- muotoa ei Suomessa ole tavattu, Ruotsissa kylläkin ajoittain kaivosten sivukivissä, mutta sen esiintymisen mahdollisuus täälläkin on otettava huomioon. Runkoaineen alkalireaktioita ei myöskään Suomessa ole tavattu.

Taulukko 1. Yleisimpien kivilajiemme ominaisuuksia
/15, 30, 19/

	Pur.lujuus MN/m ²	kovuus sitkeys	eritt. hyvä kulutuskest.	eritt. hyvä murskaustuote
Syväkivilajit: Graniitti	200 - 250	h	x	
- rapakivi	120 - 180	h		
- pegmatiitti	160 - 310	h		
Gabro	260 - 350	s		x
- diabaasi	490		x	
Metamorfiset kivilajit: Gneissit	130 - 300	h	x	
Kalkkikivi	60 - 150	p		
Anfiboliitti	180 - 420	s		
Kvartsiitti	200 - 300	k	x	x
h = hauras p = pehmeä k = kova s = sitkeä				

Suomen kallioperää voidaan siis teknisiltä ominaisuuksiltaan pitää erinomaisena betonin runkoainelähteenä. Kalliosta murskatun kiviaineksen eduksi voidaan myös laskea sen puhtaus eli epäpuhtauksia kuten humusta ei esiinny. Savea saattaa jossain määrin esiintyä lustoissa rikkonaisen kallion raoissa. Koska kalliomurske on jalostettu tuote, on sen laatutekijöihin lisäksi mahdollisuus vaikuttaa jalostusprosessissa ja saada näin laatu pysymään tasaisena.

2. KIVIAINEKSEN JALOSTUS KALLIOMURSKEEKSI

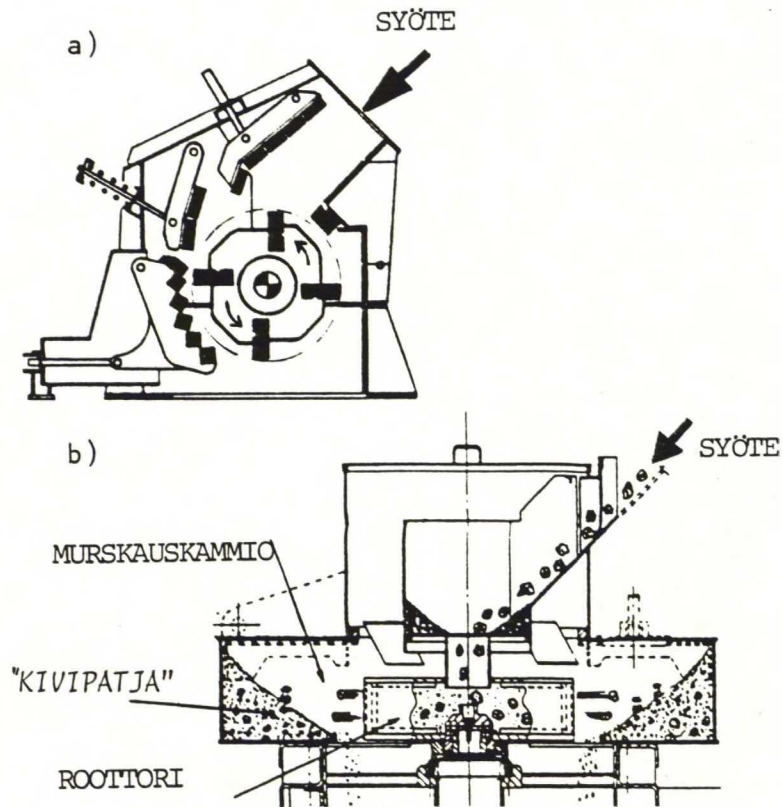
Suomessa on kova peruskallio yleensä hyvin lähellä maanpintaa ja usein näkyvissäkin. Sen vuoksi rakentamistoiminnan yhteydessä joudutaan usein tekemisiin louhintatöiden kanssa. Valtaosa louhintatöistä on avolouhintaa, mutta lisääntyvässä määrin myös maanalaista louhintaa. Louhintatekniikkana voidaan käyttää joko räjähteettämiä menetelmiä, kuten jyrsintä ja poraus, tai räjäytysmenetelmiä. Jo louhintavaiheella on merkitystä tulevan kalliomurskeen ominaisuuksiin mm. räjäytyksessä mahdollisesti syntyvien mikrohalkeamien muodostumiseen.

Louheen jatkojalostus suoritetaan murskaamoissa esi-, väli- ja jälkimurskausvaiheissa. Esimurskaimina käytetään leukamurskaimia, välimurskaimina pienempiä leukamurskaimia tai karamurskaimia ja jälkimurskaimina kara- tai kartiomurskaimia. Tällaisen kolmivaiheisen murskausprosessin kokonaismurskaussuhde on käytännössä 40 - 60. Murskaussuhde on lähtömateriaalin ja murskatun tuotteen suurimman rakeen läpimittojen suhde.

Murskaimissa kivi musertuu palasiksi hitaassa puristuksessa kahden kovan pinnan välissä. Tällöin syntyy suomalaisista kovista kivilajeista paljon puikkomaisia ja liuskeisia rakeita. Erityisesti leukamurskaimella tuotetun murskeen raemuotoon ei paljoakaan voida vaikuttaa, vaan raemuoto määräytyy pääosin kivilajin ominaisuuksien perusteella. Erityisesti voimakkaasti suuntautuneet kivilajit murskautuvat puikkomaisiksi ja liuskeisiksi. Paremman muotoista mursketta saadaan, jos viimeisen vaiheen murskaussuhde pidetään pienenä tai lisätään murskausvaiheita. Eräissä murskaimissa raemuoto paranee, jos murskaustila voidaan pitää aina täynnä.

Hieman suurempiin konekohtaisiin murskaussuhteisiin päästään iskumurskaimilla. Nämä ovat Suomessa toistaiseksi

harvinaisempia johtuen kaikissa kivilajeissamme esiintyvän kvartsin nopeasta kuluttavasta vaikutuksesta. Näitä jälkimurskaimina käytettäessä saadaan enemmän kuution muotoisia sekä kulmistaan hieman pyöristyneitä rakeita riippumatta juurikaan kivilajista. Vaikutus perustuu iskumurskaimen roottorin iskupalkkien iskevään voimaan, jolloin kivet sinkoilevat törmäten toisiinsa ja kulutuslevyihin. Mikäli iskupalkit ovat niveltapein varustettuja ja siten heilah-televia, nimitetään murskainta vasaramurskaimeksi. Iskupalkkien kehänopeus saattaa olla jopa 40 m/s.



Kuva 1. Iskumurskaimia.

- | | |
|-----------------------|--|
| a) iskupalkkimurskain | - voimakas kulutusosien kuluminen |
| b) kubisaattori | - pieni murskaussuhde, lähinnä kulmia pyöristävä vaikutus, synnyttää paljon kivituhkaa |

Murskauslaitteistoon kuuluu murskainten lisäksi seulastoja sekä kiviaineksen syöttimiä ja kuljettimia. Kiviainekset välivarastoidaan ennen betoniasemalle kuljetusta. Jatkojalostukseen kuuluu myös kiviainesten pesu. Tämä on useimmiten tarpeetonta, sillä murskeen pintaan jäänyt vähäinen kivipöly irtoaa helposti betonimassan sekoitusvaiheessa, eikä näin ollen heikennä murskeen ja sementtikiven välistä tartuntaa. Murskauksessa syntyvä, seulottavaksi liian hienojakoinen kivituhka voidaan edelleen lajitella erottamalla siitä kaikkein hienojakoisin filleriaines pois. Tämä voi tapahtua puhaltamalla paineilmalla kuivasta kivituhkasta hienoin kivipöly pois tai käyttämällä joko märkäseulontaa tai märkälajittelua.

3. KALLIOMURSKEEN OMINAISUUDET

Koska betonin tilavuudesta 65 - 80 % on runkoainetta, on sen laatuun ja ominaisuuksiin kiinnitettävä erityistä huomiota. Runkoaineen suuresta tilavuusosuudesta johtuen sen ominaisuuksien muutoksilla on välitön vaikutus tuoreen betonin ominaisuuksiin. Kovettuneen betonin ominaisuuksiin runkoaine vaikuttaa välittömästi omilla fysikaalisilla ominaisuuksillaan sekä välillisesti tuoreen betonimassan seossuhteiden muutosten kautta.

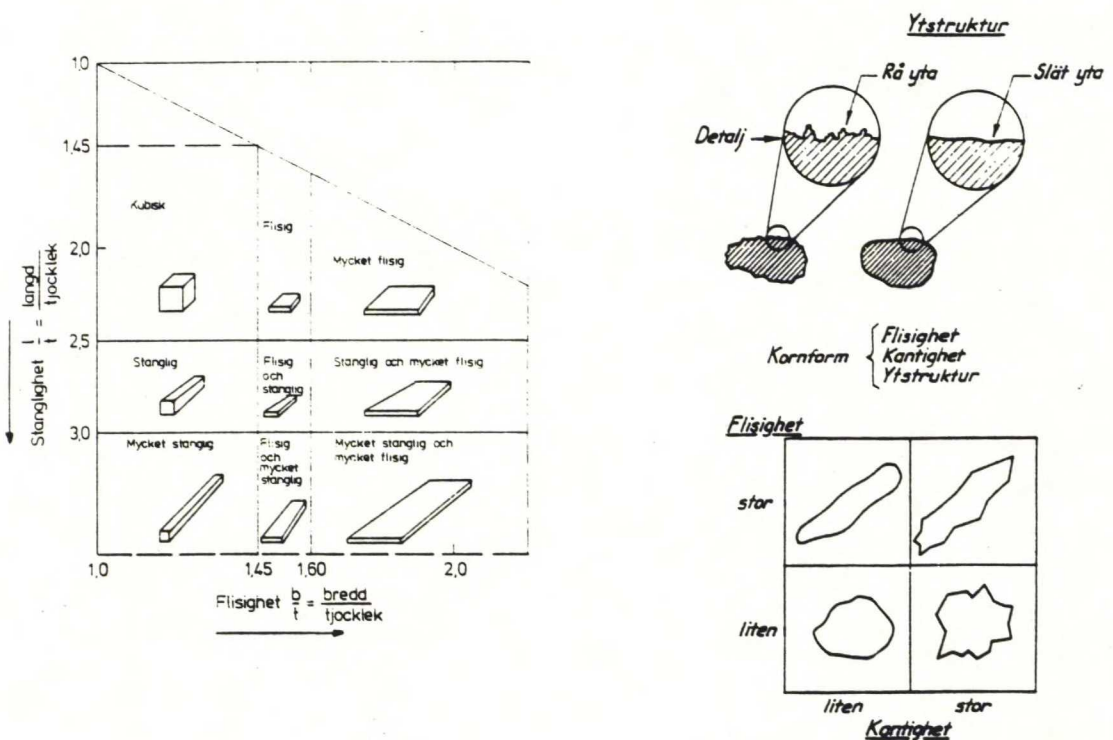
Betonin kiviainesten luokitusohjeissa /1/ käsitellään ensisijaisesti suomalaista luonnon kiviainesta, mutta ne koskevat myös kalliomurskeita. Niiden mukaan tärkeimmät valvottavat ominaisuudet betoniteknologian kannalta ovat rakeisuuden vaihtelu, epäpuhtaudet (liete ja humus) sekä kiviaineksen kosteuspitoisuus. Kuitenkin on yleisesti tunnistettu, että kiviaineksen raemuodolla on myös merkittävä vaikutus betonin ominaisuuksiin, erityisesti tuoreen betonimassan veden tarpeeseen ja sitä kautta lujuuksiin.

Yksinkertaistetusta Nykäsen suhteitusnomogrammistakin voidaan havaita, että kun betonisoran rakeisuus muuttuu ääriarvosta toiseen pysyen kuitenkin kiviainesten luokitusohjeiden luokan II sallimalla vaihtelualuella, on tällä rakeisuusluvun muutoksella betonimassan veden tarpeeseen tai notkeuteen yhtä suuri merkitys kuin sepeliprosentin nostamisella nollasta 50:een tai vaihtoehtoisesti 50:stä 80 prosenttiin. Kiviaineksen raemuoto on siis eräs tärkeimmistä ominaisuuksista, mutta sen määrittämiseksi ei ole olemassa yhtä vakiintuneita menetelmiä kuin muille valvottaville ominaisuuksille. Yksinkertaisten menetelmien luotettavuudesta ja käyttökelpoisuudesta ei taasen ole tarpeeksi tietämystä.

Tässä luvussa esitetään kalliomurskeen fysikaalisia ominaisuuksia painottuen niihin, jotka merkittävimmin poikkeavat luonnon muovaaman kiviaineksen ominaisuuksista.

3.1 Raemuoto

Raemuotoa voidaan kuvata kuutiomaisuudella, kulmikkuudella ja pinnan rakenteella. Kuutiomaisuus kertoo pituuden, leveyden ja paksuuden keskinäiset suhteet, jolloin puhutaan kuutiomaisista, puikkoisista sekä liuskeisista rakeista. Kulmikkuudella tarkoitetaan runkoainerakeen reunojen ja kulmien pyöristyneisyyttä ja rakeet jaetaan kulmikkaisiin, kulmistaan pyöristyneisiin sekä pyöreäkulmaisiin rakeisiin. Pinnan laatu voi taasen olla sileä tai karhea /6, 9/. Näitä ominaisuuksia selventää kuva 2.



Kuva 2. Raemuotoon ja pintastruktuuriin liittyviä käsitteitä Sällstömin /35/ ja Höbeda, Johanssonin /10/ mukaan.

Raemuoto voidaan Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen koetusohjeiden /3/ mukaan määrittää kulmikkuusluvun tai muotoarvon avulla. Kulmikkuusluvun R määrittäminen perustuu siinä Powers'in esittämään tapaan /29/:

$$R = 1 + 4,44 (E - 0,42), \text{ missä}$$

E = runkoaineseoksen tyhjätila tiivistämättömänä vedessä

Murdock /22/ puolestaan esittää raemuodon määrittämiseksi kulmikkuusindeksiä (angularity index), joka lasketaan seuraavasti:

$$F_a = (3 \times F_n) / 20 + 1, \text{ missä}$$

F_a = kulmikkuusindeksi

F_n = kulmikkuusluku, jonka arvoksi Shergold /34/ on määrittänyt tiivistetyn runkoaineseoksen huokostilan prosentteina, josta on vähennetty arvo 33 (angularity number).

Kulmikkuusindeksit vaihtelevat useimmiten välillä 1.1 (pyöreähkö luonnon muovaama rae) ja 2,5 (kulmikas murskattu rae). Powersin kulmikkuusluvut vaihtelevat vastaavasti välillä 1,1 - 1,7 ja Shergoldin kulmikkuusluvut nolasta 9:ään. Muita raemuodon määrittämis menetelmiä on esitetty viitteessä /20/ sekä Hylkilän diplomityössä /9/, jossa eri menetelmiä on lisäksi vertailtu keskenään.

Runkoaineen muotoarvo on visuaalinen ja vaivalloinen raemuodon määrittämis menetelmä rakeen paksuuden (a), leveyden (b) ja pituuden (c) avulla. Lopputulos ilmoitetaan kaksoissuhteena

$$1/(b:a)/(c:a) \quad a < b < c, \text{ missä}$$

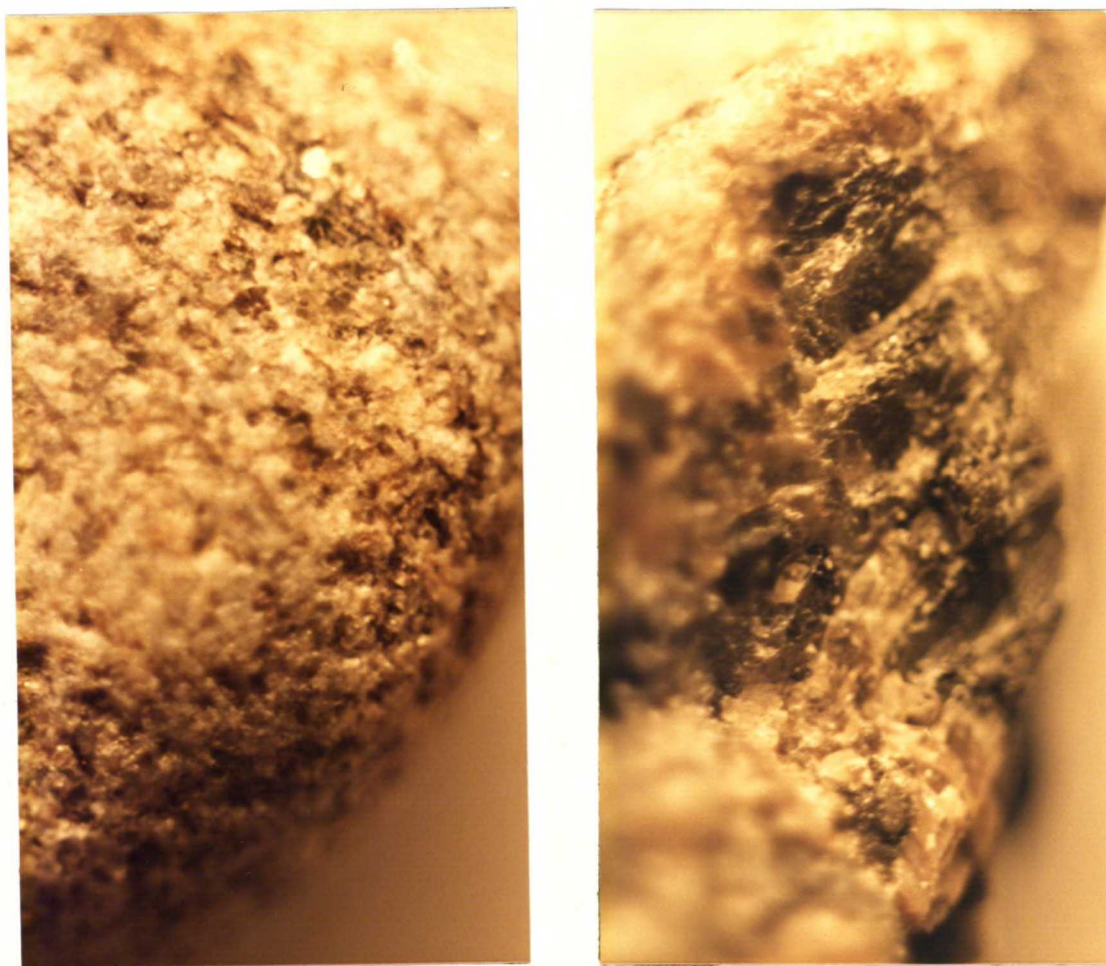
$$\frac{b}{a} = \text{liuskeisuus}$$

$$\frac{c}{a} = \text{puikkoisuus}$$

Muotoarvoa voidaan käyttää ainoastaan karkeiden runkoainearakeiden muodon keskinäisiin vertailuihin. Kulmikkuusluvun määrittäminen voidaan taas tehdä myös hienoimmille rakeille, joiden merkitys betonin ominaisuuksiin on suurempi kuin karkeiden rakeiden. Näin ollen joko tiivistämättömän (Powers) tai tiivistetyn (Shergold) kiviaineksen väliin jäävä huokostila kuvaa parhaiten rakeiden kuutiomaisuutta ja kulmikkuutta, sillä onhan selvää, että kulmikkaat liuskeiset ja puikkoiset rakeet pakkautuvat löyhemmin ja vaativat enemmän tyhjättilaa. Erityisesti Powersin koe soveltuu Hylkilän /9/ mukaan hyvin kulmikkisuuden tutkimiseen helppoutensa vuoksi, lisäksi se on hyvin herkkä raemuodon vaihteluille.

Tässä tutkimuksessa mitattiin yhdistetyn runkoaineen huokostilaa myös ns. IC-laitteella (liite 1), jossa runkoaine tiivistettiin voimakkaasti leikkaavilla ja puristavilla liikkeillä. Kalliomurskeen määrän eli koko runkoaineen kulmikkisuuden ja huokostilan välille voitiin määrittää selvä korrelaatio, kuva 14.

Kiviaineksen pintastruktuuria yksistään ei nopeasti ja yksinkertaisin keinoin voida arvostella muuten kuin silmämääräisesti. Esimerkiksi ominaispinta-alan suuruuteen pinnan karheudella on huomattava vaikutus, joskin raemuodollakin on siihen oma vaikutuksensa. Usein raemuodosta puhuttaessa käsitetään sillä sekä rakeen fyysisiä mittasuhteita että sen pintastruktuuria, sillä niiden yhteistä vaikutusta on mahdoton eritellä. Kulmikkuusluvun suuruuteen on siis myös rakeiden pinnan karheudella jonkin verran vaikutusta. Viitteessä /38/ on käsitelty monimutkaisempia menetelmiä pintastruktuurin määrittämiseksi. Kuvas- ta 3 on havaittavissa luonnon muovaaman kiven ja murskatun kiven pintastruktuurien erot.



Kuva 3. Tutkimuksessa käytettyjen kivien pinnan karheus. Vasemmalla luonnon muovaama, oikealla murskattu raekooltaan alle 16 mm:n kivi.

3.2 Puhtaus

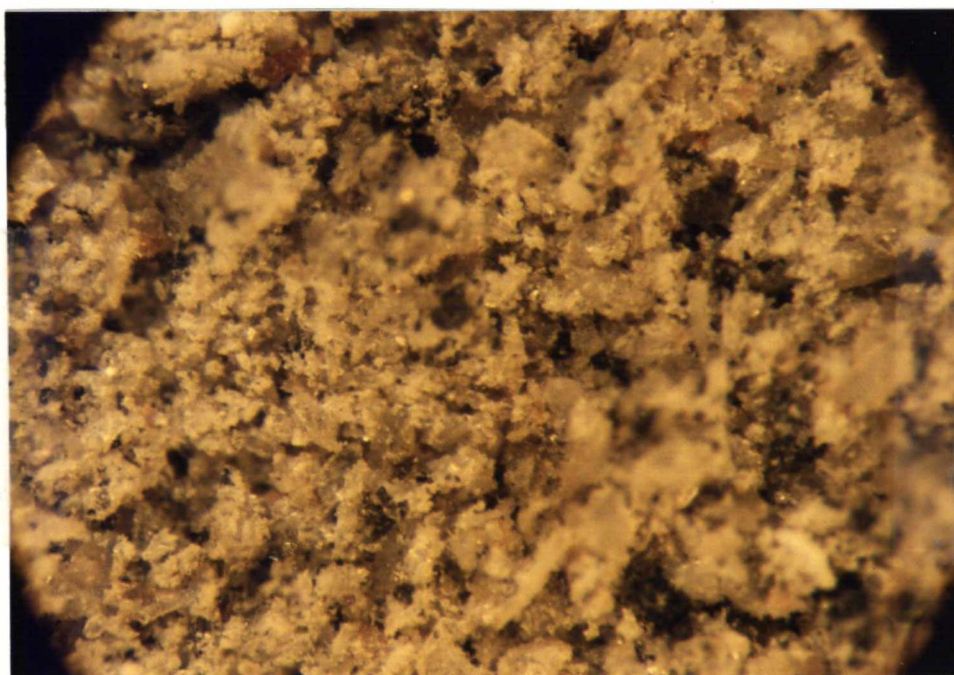
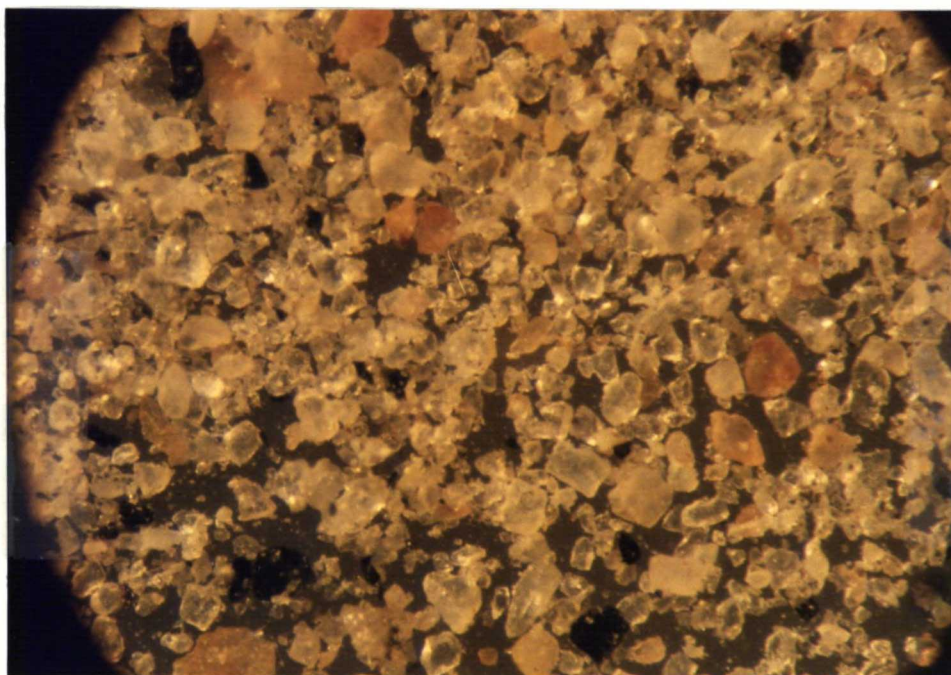
Humushappoja ja sen johdannaisia ei kalliomurske sisällä, mikäli kallion päällinen pintamaa on huolellisesti poistettu ennen louhintaa. Murskausprosessissa syntyy paljon hienojakoista kovaa murskepölyä, joka saattaa nostaa runkoaineen lieteprosenttia. Alle 0,074 mm:n lietteellä on kuitenkin tiettyyn määrään asti betonin ominaisuuksia parantava vaikutus johtuen sen hienorakeisuudesta.

Ainoastaan rakeiden pintaan kiinnitarttuneena se saattaa heikentää runkoaineen ja sementtikiven välistä tartuntaa. Esimerkiksi Englannissa on murskatun kiviaineksen liete- ja filleripitoisuuksille annettu lievemmat raja-arvot (British Standards 882). Osa lietteestä saattaa kuitenkin olla haitallista hienorakeista savea. Rikkonaisen kallion raoissa esiintyvä saviaines ei ole yleistä, mutta sen esiintymismahdollisuus on otettava huomioon.

3.3 Muut ominaisuudet

Kalliomurskeen lujuuteen on louhinnan väitetty vaikuttavan heikentävästi ja murskauksen parantavasti. Jalostusprosessin vaikutus on kuitenkin sekä lujuuteen että kimmokertoimeen lähes olematon /6/. Irtotiheys on murskeella suuremmasta tyhjätilasta johtuen pienempi kuin luonnon kiviaineksella. Tämän vuoksi sen kosteuspitoisuus saattaa vaihdella voimakkaammin, sillä kuivuminen ja kostuminen tapahtuvat nopeammin. Murskeen kosteuspitoisuuteen sen suurempi ominaispinta-ala vaikuttaa suurentavasti, mutta vaikutus on hyvin pieni ulkoisiin olosuhteisiin verraten. Vaikka vedenimu suomalaisilla kivilajeilla on käytännössä hyvin pieni, on murskatun kalkkikiven vedenimu syytä usein selvittää. Kulutuskestävyys on murskeella sen raemuodon ansiosta parempi. Pakkasen aiheuttama rapautuminen on joillekin murskeille mahdollista, mutta erittäin harvinaista. Tämä johtunee murskauksessa tai todennäköisemmin räjäytyslouhinnassa syntyneistä mikrohalkeamista /21/.

Murskeen alle 0,125 mm:n filleriosuus on hienojakoisempaa kuin luonnonfillerillä. Murskefillerirakeiden välillä vallitsee sähköstaattisia koheesiovoimia, jotka vetävät rakeita toisiinsa kiinni ja muodostavat kennomaisia hiukkaskasaumia, kuva 4. Tätä ilmiötä ei luonnonfillerillä esiinny. Pääasiassa näiden voimien avulla murskefilleriaines pysyy kiinni isompien rakeiden pinnassa. Staattiset sähkövaraukset syntyvät todennäköisesti murskausprosessissa.

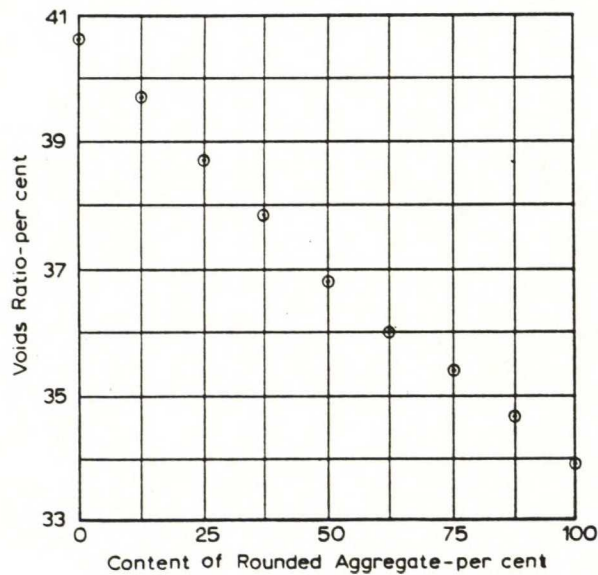


Kuva 4. Mikroskooppikuvat tutkimuksen filleriaineksista.
Yläkuvassa luonnonfilleri, alla murskefilleri.
50 x suurennos.

4. KALLIOMURSKEEN VAIKUTUS TUOREEN BETONIN OMINAISUUKSIIN

Betonimassassa sementtiliimaa on oltava riittävästi kostuttamaan runkoainerakeiden pinta sekä täyttämään niiden välinen tyhjätila. Sementtiliimamäärä on näin riippuvainen rakeen ominaispinta-alasta sekä runkoainerakeiden välisestä tyhjätilasta, joka määräytyy raemuodon, yhdistetyn rakeisuuden sekä tiivistystavan perusteella.

Murskatun runkoaineen ominaispinta-ala ja tyhjätila suurenevät runkoaineen kulmikkuuden ja kokonaismurskemäärän kasvaessa, kuva 5.

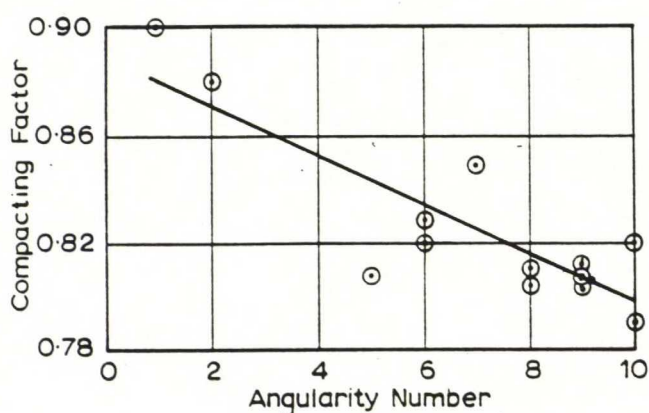


Kuva 5. Tyhjätilan riippuvuus murskeen prosentuaalisesta määrästä eli runkoaineseoksen kulmikkuudesta /23/.

Mikäli betonimassan muokkautuvuus halutaan murskemassoilla säilyttää entisellään on Poijärven /21/ mukaan betoniseos tehtävä lihavammaksi eli lisättävä veden, sementin sekä runkoaineseoksen hiekka- ja filleriosan määrää. Hiekka- ja fillerilisäys täyttäisivät suurentuneen tyhjätilan ja runkoaineseoksen suurentunut kitkaisuus kompensoitaisiin veden lisäyksellä. Veden lisäys tekee sementtiliimasta notkeampaa, joten filleriä tarvitaan myös veden erottumisen estämiseksi. Vesisementtisuhdetta pidettäessä vakiona on sementtimäärää myös lisättävä. Muutosten suuruutta voidaan karkeasti arvioida tyhjätilan avulla ja tarkemmin betonikokeilla.

4.1 Notkeus ja vedentarve

Mikäli kulmikkaampaa karkeaa kiviainesta käytettäessä ei veden lisäystä tehdä, massan notkeus pienenee Kaplanin /14/ ja Shergoldin /34/ mukaan lineaarisesti kuvan 6 mukaisesti.



Kuva 6. Betonimassan notkeus (compacting factor) kiviaineksen kulmikkisuuden (angularity number) funktiona.

Kaplanin mukaan runkoaineen kulmikkisuuden muutoksella on suurempi merkitys työstettävyyteen kuin liuskeisuuden tai muotoarvon muutoksella. Pintastruktuurin ja työstettävyyden välille ei hän karkealla kiviaineksella löytänyt korrelaatiota eli ominaispinta-alan kasvun merkitys työstettävyyteen oli vähäinen.

Hylkilä /9/ on todennut murskeen muotoarvon ja betonimassan veden tarpeen välisen korrelaation varsin heikoksi, sillä se ei ota hienoainesta huomioon. Muotoarvo soveltuu tästä syystä huonosti raemuodon mitaksi, varsinkaan kun rakeen kulmikkuus ei käy muotoarvosta ilmi.

Wills /37/ totesikin laajoissa tutkimuksissaan, että hienon runkoaineen merkitys veden tarpeeseen on huomattavasti suurempi kuin karkean. Neljän prosentin tyhjätilan kasvu hienossa runkoaineseoksessa aiheutti 2 - 3 kertaa suuremman veden tarpeen lisäyksen kuin vastaava tyhjätilan kasvu karkeassa runkoaineseoksessa. Bloem ja Gaynor /4/ havaitsivat hienon kiviaineksen kulmikkuudella olevan betonin veden tarpeeseen ainakin yhtä suuri vaikutus kuin karkean kiviaineksen kulmikkuudella.

Malmbergin kirjallisuustutkimuksen /20/ mukaan eri tutkijat esittävät notkeuden säilyttämiseksi veden lisäystä 10 - 45 l/m³, kun luonnon muovaava kiviaines vaihdetaan murskattuun. Veden tarpeen ja kiviaineksen kulmikkisuuden eli tyhjätilan välille on pystytty määrittämään useimmiten lineaarinen riippuvuus. Tämä on Hylkilän /9/ mukaan sitä luotettavampi, mitä useammasta lajitteesta kulmikkuusluku määritetään. Veden tarpeen sekä rakeen liuskeisuuden ja puikkoisuuden välille ei vastaavaa selväpiirteistä korrelaatiota kirjallisuudessa ole esitetty.

4.2 Työstettävyyys

Notkeuden säilyttämiseksi tarvittava lisävesi saattaa tehdä murskemassojen veden erottumisen ongelmalliseksi, erityisesti suuremmilla vesisementtisuhteilla.

Colbjørnsenin /5/ mukaan murskemassoihin tulisi tästä syystä lisätä kaikkein hienoimpia aineksia. Hyvälaatuinen alle 0,074 mm:n hienofilleri veden erottumista pienentävän vaikutuksen lisäksi toimii massassa voitelevana aineena lisäämättä veden tarvetta /13, 33/. Sekä Colbjørnsen että Poijärvi suosittelevat hienon ja karkean runkoaineen suhdetta kasvatettavan, jotta suurentunut tyhjätila täyttyisi hienoaineksella, eikä massasta tulisi liian karkeata.

Rakeisuuden muutoksilla on myöskin oma vaikutuksensa veden tarpeeseen. Rakeisuusjakauma muodostuukin useimmiten huomattavasti merkittävämmäksi tekijäksi työstettävyyden kannalta kuin itse raemuoto /12, 21/.

Malmberg /20/ suosittelee suuremmilla lujuusluokilla runkoaineelle käytettäväksi epäjatkovaa rakeisuutta epäjatkovuusaukolla 2 - 4 mm. Tällä saattaa olla veden erottumista suurentava vaikutus, joka pumpattavuuden kannalta voi muodostua ongelmalliseksi. Vetelät massat olisi notkistettava lisäaineita käyttäen. Myös hän suosittelee hyvän työstettävyyden saavuttamiseksi rakeisuuden hienontamista, eritoten alhaisilla lujuuksilla, jolloin sementtiä ja lentotuhkaa on vähemmän. Sopiva filleripitoisuus olisi noin 20 % hienon alle 4 mm:n runkoaineen määrästä. Hienon ja karkean runkoaineen suhdetta pitäisi suurentaa noin 3 prosenttia.

Schäper /33/ esittää murskemassoissa käytettäväksi noin 40 prosentoin murskehiekkamäärää koko runkoaineesta sekä riittävän suurta alle 0,063 mm:n hienofillerin määrää. Notkistimia voidaan hänen mukaansa käyttää normaaliin tapaan.

Murskeiden käyttö pienentää massan ilmapitoisuutta ja myös tältä osin heikentää työstettävyyttä /23/. Runkoaineen rakeisuudella voidaan vaikuttaa ilman muodostukseen esimerkiksi hienoa hiekkaa lisäämällä. Ilman pysyvyyttä massassa voidaan edistää filleriainesta lisäämällä, joskin liian hienorakeinen filleri voi vähentää kokonaisilmamäärää /25/.

Murskatun runkoaineen käyttö ei siis aseta esteitä hyvin työstettävän betonin valmistamiseksi. Runkoaineelle esitettyjä suosituksia ja muutosohjeita ei kuitenkaan saa tulkita liian tarkasti ja yksityiskohtaisesti, kunhan seossuhteet muuten vain ovat sopivat.

Parhaimmiksi menetelmiksi työstettävyyden arvioimiseksi on esitetty VB -, compacting factor - ja remoulding-testit sekä vajoama MO -laitteella. Sen sijaan painumakokeella voidaan työstettävyyttä arvioida vain rajoitetussa määrin /12/.

4.3 Pumpattavuus

Tyhjätilan suurentuessa murskemassojen työstettävyyys ja näin myös pumpattavuus heikkenee. Työstettävyyttä parantavat toimenpiteet kuitenkin mahdollistavat pumppauksen melko suurillakin murskemäärillä. Maissa, joissa harjusoraa

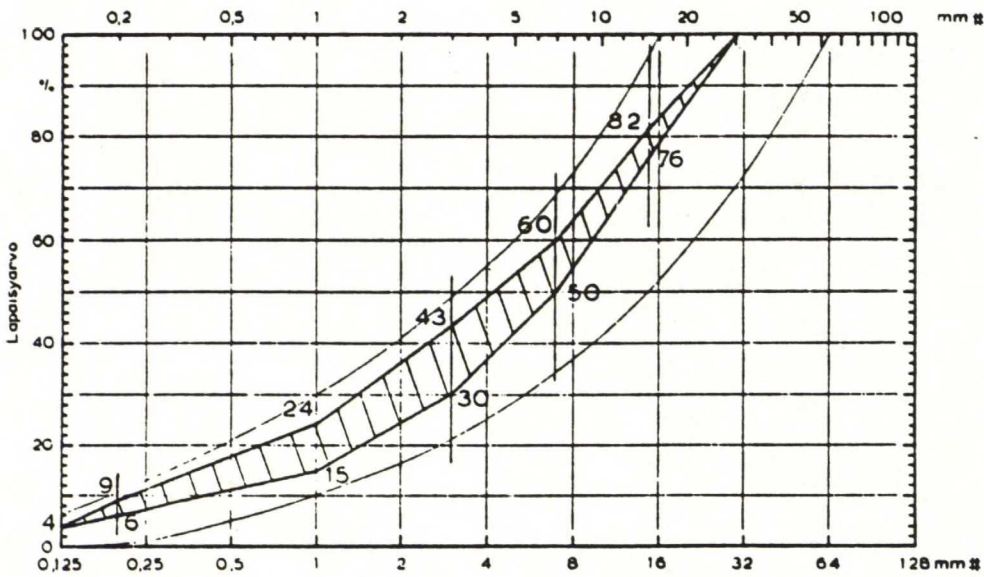
ei voida käyttää, on täysin murskeesta koostuvien massojen pumppaus suosittua /17/. Edellytyksenä on riittävä hienoainesmäärä voitelemaan massaa sekä estämään veden erottuminen ja kiviainesten raekosketus. Taulukossa 2 on esitetty eräs suositus sopivaksi hienoainesmääräksi. Kyseiset määrät ovat muihin suosituksiin verrattuna niin paljon suurempia, että niitä voidaan käyttää jopa murskemassojen hienoainesmäärien arviointiin.

Taulukko 2. Hienoainesmäärän, sideaineiden ja alle 0,25 mm:n kiviaineksen riippuvuus runkoaineen suurimmasta raekoosta ja suunnittelulujuudesta /17/.

Suunnittelulujuus (MPa)	Hienoainesmäärä kg/m ³		
	8 mm	16 mm	32 mm
K 20	600 - 620	530 - 550	500 - 520
K 25	580 - 600	515 - 535	480 - 500
K 30	560 - 580	500 - 520	460 - 480
K 35	540 - 560	485 - 505	440 - 460
K 40	520 - 540	470 - 490	420 - 440

Liian suuri hienoainesmäärä saattaa tehdä pumpattavasta massasta liian kittimäistä. Tämä on kuitenkin erittäin harvinainen syy pumppauksen epäonnistumiseen varsinkin murskemassoilla.

Yhdistetyn runkoaineen rakeisuudesta on Suomen Betonteollisuuden Keskusjärjestö (SBK) antanut kuvan 7 mukaisen suosituksensa pumpattavalle massalle. Rakeisuutta on murskeita käytettäessä hienonnettava harkinnan mukaan.



Kuva 7. SBK:n suositus pumppubetonimassan yhdistetyn runkoaineen rakeisuuskäyrän muodosta /17/.

Edellä lueteltujen runkoaineen rakeisuuden muutosten lisäksi voidaan murskemassojen pumpattavuutta parantaa lisäämällä erittäin hienorakeisia aineksia, esim. lentotuhkaa ja hienoksi jauhettuja mineraaliaineksia. Lisäaineista huokostimien ja notkistimien käytön on todettu parantavan pumpattavuutta. Murskemassoilla, joilla suuren tyhjätilavuuden johdosta on taipumusta veden erottumiseen, saattaa suuren notkistinmäärän käyttö johtaa putkiston tukkeutumiseen, koska se vähentää veden virtausta vastustavaa sisäistä kitkaa. Varsinaisista pumpattavuutta parantavista lisäaineista on ulkomailta saatu positiivisia kokemuksia /17/.

Murskatun kiviaineksen sanotaan kuluttavan enemmän putkistoja ja laitteistoja, joskin hyvin suhteitetun murskemas-
san kuluttavasta vaikutuksesta on olemassa päinvastaisia-
kin mielipiteitä.

5. KALLIOMURSKEEN VAIKUTUS KOVETTUNEEN BETONIN OMINAISUUKSIIN

5.1 Lujuus

Normaalibetonien lujuus on pääasiassa riippuvainen sement-
tikivestä sekä runkoainerakeen ja sementtikiven välisestä
tartunnasta. Suomalaisen kiviaineksen lujuus on normaali-
betonin lujuuteen verraten niin paljon suurempi, ettei sen
pienillä vaihteluilla ole käytännön merkitystä.

Kulmikkaat murskerakeet vaikuttavat lujuuteen välillisesti
suuremman tyhjätilansa vuoksi veden tarvetta lisäämällä.
Tällöin pienenee runkoaineen tilavuusosuus, mikä osaltaan
pienentää lujuutta. Suurempi vaikutus on kuitenkin sement-
tiliiman vesisementtisuhteen suurenemisella, joka kasvat-
taa sementtikiven huokoisuutta ja pienentää lujuutta.

Kulmikkaan ja pinnaltaan rosoisen murskerakeen paremmalla
tartunnalla on välitön lujuutta parantava vaikutus. Tar-
tuntaan vaikuttavat sekä rakeen muoto, johon murskaus-
vaiheessa on mahdollisuus vaikuttaa, että pintastruktuuri,
joka pääosin riippuu kivilajin rakenteesta. Murskerae saa
aikaan paremman mekaanisen tartunnan, kun kitka rakeen ja
sementtikiven välillä kasvaa. Tätä edesauttaa rakeen mine-
raloginen heterogeenisuus ja pinnan puhtaus. Tartuntaan
vaikuttaa myös rakeen kemialliset ominaisuudet eli reagoi-
ko se kalkkikiven tapaan pinnaltaan sementtiliiman

kanssa sekä pinnan elektrostaattinen tila, johon murskausprosessilla saattaa olla vaikutus. Kiviaineksen ominaisuuksien vaikutuksesta faasirajakerrokseen ei kuitenkaan ole riittävästi tietoa.

Yleisesti ollaan sitä mieltä, että murskatulla kiviaineksella saadaan suurempi betonin lujuus, erityisesti taivutusvetolujuus kuin luonnon muovaamalla kiviaineksella samaa vesisementtisuhdetta käyttäen. Tämä on erityisen merkityksellistä korkealujuuksista betonia ajatellen. Hyvän tartunnan tuottama lujuudenlisäys antaa mahdollisuuden käyttää suurempia vesisementtisuhteen arvoja /5, 28/. Vaikka murskemassojen veden tarve on suurempi kuin luonnon kiviainesta käytettäessä, antavat ne siitä huolimatta yleensä saman puristuslujuuden vakiomäärällä sementtiä /9/. Eri tutkijat ovat saaneet murskebetonien lujuuksista kuitenkin ristiriitaisia tuloksia. Tämä johtuu erilaisista tutkituista runkoaineista ja niiden määristä eli siitä, onko niiden lisääntyneen veden tarpeen vaikutus lujuuteen suurempi kuin paremman tartunnan vaikutus. Grønhaugin /6/ mukaan veden tarpeen kasvun merkitys puristuslujuuteen on suurempi kuin tartunnan lisääntymisen. Goldbjörnsen /5/ mukaan nämä vaikutukset kutakuinkin kumoavat toisensa. Marvanin /20/ on esittänyt puristuslujuuksien laskevan, mutta taivutusvetolujuuden kasvavan murskepitoisuuden lisääntyessä. Muita tutkimustuloksia löytyy Malmbergin /20/ kirjallisuustutkimuksesta.

Wills /37/ totesi tutkimuksissaan, että hieno kiviaines vaikutti puristuslujuuteen melkein kokonaan veden tarpeen muutoksen kautta, kun taas karkea kiviaines vaikutti pääasiassa tartunnan kautta. Tähän perustuen on Rothfuchs /31/ esittänyt, että luonnonhiekkaa 0 - 3 mm ja tätä karkeampaa mursketta yhdessä käytettäessä ei veden tarve nouse liian suureksi ja tietyissä tapauksissa on mahdollisuus jopa sementin säästöön.

Saman lujuusluokan saavuttamiseksi on murskattua runkoainetta käyttäen mahdollisuus käyttää taulukon 3 mukaisesti suurempia vesisementtisuhteita kuin luonnon muovaamalla kiviaineksella.

Taulukko 3. Saksalaisten lujuusluokkien edellyttämät vesisementtisuhteet Rothfuchsin mukaan /31/.

runkoaine	vesisementtisuhde		
	B 225	B 300	B 450
luonnonmuokk.	0,73	0,65	0,49
murskattu	0,86	0,73	0,56

Länsi-Saksassa alueilla, joissa murskebetonin käyttö on suosittua, käytetään alle 2 mm:n lajitteena vielä luonnonhiekkaa. Schäper /33/ onkin tutkinut mahdollisuutta korvata luonnonhiekkamurskeella. Murskehiekkojen suurentunut veden tarve ei pienentänyt betonin lujuuksia, taulukko 4.

Taulukko 4. Lujuuksien kehitys, kun raekooltaan alle 2 mm:n luonnonhiekkakorvataan murskeella /33/.

	100 % luonnon- hiekk	50/50	100 % murske- hiekk
Puristuslujuus (MPa)	35,5	37,5	36,0
Taivutusvetolujuus (MPa)	6,5	6,2	6,7
Vesimäärä (l/m ³)	185	198	211
Vesisementtisuhde	0,61	0,63	0,66
Kokonaismurske %	60	80	100

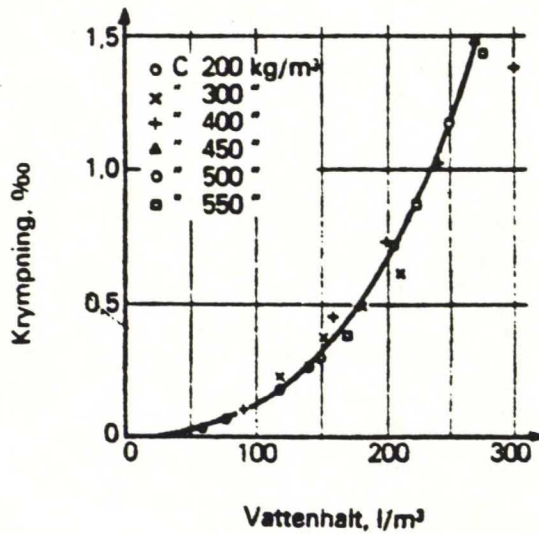
Hylkilä /9/ on tullut siihen johtopäätökseen, ettei kiviaineksen kulmikkuudella ole betonin puristuslujuuteen merkittävää vaikutusta, mikäli vesisementtisuhte ja notkeus pysyvät vakiona.

Malmberg /20/ toteaa yhteenvetona, että murskattua kiviainesta käytettäessä on mahdollisuus saavuttaa noin 10 % suurempia lujuusarvoja, eikä lujuustaso ole juurikaan riippuvainen murskeiden keskinäisistä raemuodon eroavaisuuksista.

Kokonaan murskattuja kiviaineksia käytettäessä on Jatkola /11/ todennut epäjatkuvarakeisella runkoaineella epäjatkuvuusaukolla 3 - 6 mm saavutettavan parempia lujuuksia ja myöskin parempi työstettävyyys kuin jatkuvarakeisella runkoaineella.

5.2 Kutistuma

Betonin virumaan ja kutistumaan vaikuttavia tekijöitä ovat lähinnä sementtimäärä ja vesisementtisuhte. Kutistuman kannalta vapaa vesimäärä on merkittävin tekijä. Niinpä murskebetonien kutistuman on yleisesti väitetty kasvavan suuremman vesimäärän ja suuremman sementtiliimaosuuden vuoksi. Kuvan 8 avulla voidaan karkeasti arvioida, kuinka suuri vaikutus veden lisäyksellä on kutistumaan.



Kuva 8. Tuoreen betonin vesimäärän vaikutus kutistumaan 50 prosentin suhteellisessa kosteudessa /24/.

Murske vaikuttaa kuitenkin kutistumaan ei ainoastaan välillisesti vesimäärän kautta, vaan myöskin omien fysikaalisten ominaisuuksiensa kautta. Runkoaineen ominaisuuksista voimakas tartunta sekä suuri kimmokerroin pyrkivät vastustamaan sementtikiven kutistumista /7/.

Yleisesti ajatellaan kutistuman kuitenkin olevan murskebetoneilla hieman normaalia suurempi riippuen tarvittavan lisäveden määrästä /11/. Tapauksesta riippuen kasvu saattaa olla 10 - 50 % /27/. Murskefillerin vaikutus kutistumaan on samanlainen kuin luonnonfillerinkin /26/.

5.3 Pakkasenkestävyys

Colbjornsen /5/ on tehnyt pakkasenkestävyyskokeita murskehiekkaa ja murskefilleriä käyttäen. Hän totesi murskebetoneilla pakkasenkestävyyden olevan huonompi alhaisilla lujuusluokilla eli vesisementtisuhteella 0,7, kun ilmapitoisuus oli 3 % tai 6 %. Korkeammilla lujuusluokilla vesisementtisuhteella 0,45 ei eroja lisähuokostetulla betonilla havaittu. Huonomman pakkasenkestävyyden hän arvelee johtuvan murskebetonin suuremmasta vesi- ja sementtiliimamäärästä, pienemmästä suojahuokossuhteesta sekä terävasärmäisestä raemuodosta.

Suurempi vesi- ja sementtiliimamäärä kasvattaa kapillaarihuokosten ja niiden kautta myös jäätyvän veden määrää. Murskefillerit puolestaan hienorakeisuutensa vuoksi täyttävät osan suojahuokosista ja pienentävät suojahuokossuhdetta. Veden jäätyminen ja sen tilavuuden kasvu aiheuttavat betoniin rasituksia. Nämä rasitukset aiheuttavat murskerakeen terävien särmien kohdalle suuria paikallisia jännityshuippuja, jotka voivat saada aikaan sementtikivesä mikrohalkeilua. Viime aikoina on ryhdytty epäilemään myös itse murskerakeen pakkasenkestävyyttä. Mahdolliset jalostusprosessissa syntyneet mikrohalkeamat saattavat aiheuttaa murskerakeessa rapautumista. Tästä ei kuitenkaan ole varmaa näyttöä.

Johtopäätöksenä Colbjornsen toteaa kuitenkin, että ilman lisähuokostusta olivat sekä luonnon- että murskehiekkaa käyttäen saadut pakkasenkestävyydet varsin huonoja vesisementtisuhteesta riippumatta. Riittävän pienellä vesisementtisuhteella ja riittävän suurella lisähuokostuksella saadaan sekä murskattua että luonnon muovaamaa kiviainesta käyttäen valmistetut betonit pakkasenkestäviksi. Murskatuilla kiviaineiksilla on varauduttava suurempaan, jopa kaksinkertaiseen huokostimen annostukseen tavoiteilmamäärän saavuttamiseksi.

6. KIVITUHKAN VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN

Kivituhkalla tarkoitetaan hienorakeisen sepelin, useimmiten 3 - 8 mm:n valmistuksessa seulontavaiheessa syntyvää alarajan läpäisevää hienoainesta. Se on useimmiten nollalajite 0 - 3 mm tai jopa vieläkin hienorakeisempaa. Karkealla kivituhkalla ymmärretään useimmiten nollalajitetta 0 - 6 mm.

Kuten aiemmin on todettu hienon, alle 3 - 4 mm:n murskatun kiviaineksen käyttöä betonissa suositellaan vältettävän sen voimakkaan veden tarvetta lisäävän vaikutuksen vuoksi. Tämä johtuu pääosin kivituhkan huomattavasti suuremmasta ominaispinta-alasta. Raekoon alaraja, jota hienompaa mursketta ei enää ole järkevää käyttää, on tapauskohtaisesti määritettävissä.

Murskausprosessissa syntyy aina erittäin hienojakoista murskepölyä, joka sähköstaattisten voimien avulla pysyy kiinni isompien murskerakeiden pinnassa. Tämä murskepöly irtaana betonimassan sekoituksessa melko helposti ja jää toimimaan filleriaineksenä. Tämä alle 0,125 mm:n murskefilleri, jonka fysikaalisia ominaisuuksia on tarkasteltu luvussa 3.3, eroaa suuresti luonnonfilleristä ja aiheuttaa betonin ominaisuuksiin merkittäviä muutoksia. Poijärvi /26/ totesi murskefillereiden käytön tuottavan yleensä jonkin verran jäykemmän betonimassan, joskin mainitsee niiden vaikutuksen perustuvan enemmänkin määrään kuin ominaispinta-alaan ja mineralogiseen koostumukseen. Notkeuden ja tiivistyvyyden kannalta edullisin murskefillerimäärä on likimain sama kuin luonnonfillereillä. Hienojakoisuudesta johtuen veden erottuminen on murskefillereillä vähäisempää, kalkkikivifillereillä jopa puolet pienempi /18/. Lehmusojä /18/ mainitsee kalkkikivifillerillä olevan myöskin kiviaineksen erottumista pienentävä vaikutus.

Murskefillereillä saavutetut lujuusarvot ovat suurempia kuin luonnonfillereitä käytettäessä. Puristuslujuuden kasvu murskefillereihin siirryttäessä on sitä suurempi, mitä suurempi murskeen ominaispinta-ala ja betonin vesisementtisuhde on. Pakkasenkestävyys saattaa huonontua murskefillereitä käytettäessä. Tämä johtuu pääosin siitä, että ne hienojakoisempina tiivistävät ja täyttävät ilmahuokosia, jolloin ilmapitoisuus pienenee. Mitä parempi tiivistysmenetelmä on käytössä, sitä parempi tiiviys ja todennäköisesti aina vaan huonompi pakkasenkestävyys saavutetaan /26/. Mutta kuten aiemmin on todettu, riittävällä lisähuokostuksella voidaan murskefillereiden, niinkuin murskehiekkojenkin epäedullinen vaikutus betonin pakkasenkestävyyteen eliminoida ja valmistaa riittävän pakkasenkestävää betonia.

Luonnonfilleriaines on siis menestyksellisesti korvattavissa murskatulla filleriaineksella /18/. Sen sijaan hie-non hiekan korvaaminen kivituhkalla ainakaan kokonaisuudessaan ei ole osoittautunut tutkimusten mukaan järkeväksi.

7. TUTKIMUSOHJELMA

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kalliomurskeen ja sen laadun vaikutusta tuoreen ja kovettuneen valmisbetonin ominaisuuksiin. Jotta betonin eri ominaisuuksien muutoksia ja muutosten merkitystä betonin toimivuuteen voitiin seurata laajalti, rajoitauduttiin tarkastelemaan pääasiassa vain yhden murskaamon murskeita. Nämä murskelajitteet pysyivät raemuodoltaan vakioina koko tutkimuksen ajan ja edustivat sekä muodoltaan että rakeisuudeltaan tyyppillisiä suomalaisen murskaamon vakiolajitteita. Vertailuna käytettiin luonnon muovaamasta kiviaineksesta valmistettua betonia. Lisäksi selvitettiin kuinka suuri osa valmisbetonin luonnon muovaavasta runkoaineesta voitiin korvata kalliomurskeella eli muutettiin yhdistetyn runkoaineen keskimääräistä raemuotoa yhä kulmikkaammaksi.

Erimuotoisia murskeita tutkittiin suppeammalla koesarjalla laboratoriossa, jossa selvitettiin niiden erilaisten raemuotojen vaikutusta betonin ominaisuuksiin tietyllä vakio-murskemäärällä. Nämä tulokset on yhteenvetona esitetty luvussa 10.5.

Tutkimus jakaantui kolmeen osaan: kirjallisuustutkimukseen, laboratorio- ja kenttäkokeisiin. Laboratoriokokeissa käytettiin pääosin samoja murskelajitteita kuin kenttäkokeissa eli 0 - 3 mm, 8 - 16 mm sekä 16 - 32 mm. Lisäksi laboratoriokokeissa oli käytettävissä murskelajite 0 - 6 mm ja kenttäkokeissa murskelajite 3 - 8 mm. Luonnon muovaamat kiviainekset olivat paikallisia.

Tutkittavat valmisbetonit olivat normaali yleisbetoni lujuusluokassa K20 ja K40 sekä nesteytetty ja huokostettu lisäainebetoni lujuusluokassa K40. Yleisbetonien notkeudeksi valittiin tavanomaisin luokka eli 2 - 3 sVB. Nesteytetyn betonin tavoitepainumaksi asetettiin 20 cm ja

huokostetun betonin tavoiteilmamääräksi 6 % sekoituksen jälkeen mitattuna. Maksimiraekooksi valittiin laboratorio-kokeisiin 32 mm ja kenttäkokeisiin 16 mm.

Laboratoriokokeissa tutkittiin sekä hieno- että karkea-rakeisen kalliomurskeen tärkeimmät ominaisuudet. Lisäksi määritettiin yhdistetyn runkoaineen tyhjätila eri murskemäärille IC-laitteella, liite 1. Betonimassan ominaisuuksista määritettiin muodonmuutosaika, painuma, vajoama, ilmamäärä, tiheys, lämpötila, 1 ja 3 tunnin veden erottuminen sekä tarkasteltiin silmämääräisesti massan pumpattavuutta. Kovettuneesta betonista määritettiin 7d ja 28d puristuslujuudet ja kuivatiheydet, 28d taivutusvetolujuus sekä hydrataatiokutistuma 56 vuorokauden ajan. Lisäksi määritettiin betonien puristuslujuus Break-off laitteella, jonka käyttökelpoisuutta betonin puristuslujuuden in-situ määritysmenetelmänä tutkittiin.

Kenttäkokeissa valmisbetonitehtaalla Karhulassa tutkittiin laboratorio-olosuhteissa hyviksi havaittujen betonien käyttökelpoisuus paikallisia raaka-aineita käyttäen. Betonimassan ominaisuuksista määritettiin painuma, ilmamäärä, tiheys, lämpötila sekä veden erottuminen. Lähes kaikkien massojen pumpattavuusominaisuudet tutkittiin työmaalla pumpattaessa. Erityistä huomiota kiinnitettiin ilmamäärän muuttumiseen kuljetuksen ja pumppauksen aikana. Betonimassan tiivistyvyyttä tutkittiin Break-off laitteella sekä valupintojen silmämääräisellä tarkastelulla. Kovettuneesta betonista määritettiin 7d ja 28d puristuslujuudet sekä kuivatiheydet.

Raaka-aineiden laatua seurattiin kenttäkokeissa jatkuvasti, jotta betonien todelliset koostumukset voitiin selvittää. Kiviaineksien rakeisuus, kosteus-, humus- ja liete-pitoisuudet määritettiin kaikissa kokeissa.

8. LABORATORIOKOKKEET

8.1 Materiaalitiedot

Sideaineet

Laboratoriokokeiden sideaineena käytettiin Oy Partek Ab:n Paraisten tehtaaalla valmistettua nopeasti kovettuvaa Portland-sementtiä P 40/7. Lisäksi kaikissa muissa paitsi huokostetuissa betoneissa käytettiin Naantalin kivihiili-voimalaitoksen toimittamaa lentotuhkaa, jonka hehkutus-häviö oli 1,8 %. Sementin puristuslujuudet olivat 1, 3 ja 7 vuorokauden ikäisinä 21, 38 ja 42 MPa ja sen ominais-pinta-alaksi saatiin 465 m²/kg.

Runkoaine

Tutkimuksen vertailubetoneissa käytetty runkoaine oli laboratorion raemuodoltaan pyöreähköä tai kulmistaan pyöristynyttä kiviainesta. Se oli pinnaltaan sileää, pääasiassa luonnon muovaamaa kiviainesta, jolla murtopintojen lukumäärä oli useimmiten nolla. Vaikkakin osittain murskattua ainesta erityisesti hienoaineoksen joukossa saattoi olla mukana, käsiteltiin näitä kiviaineksia luonnon muovaamina eli niiden murskeprosentti oli nolla. Kiviaines oli pääasiassa graniittia, eikä rapautuvia kivilajeja ollut joukossa. Lajitteiden seulontatulokset on esitetty taulukossa 6. Humuspitoisuudeltaan kiviaines osoittautui kelvolliseksi runkoaineeksi ja sen tiheytenä käytettiin arvoa 2680 kg/m³.

Luonnon muovaamaa kiviainesta korvaavana murskeena käytettiin Kotkan Maansiirto Oy:n toimittamaa leuka- ja kartiomurskaimilla kalliosta murskattua kulmikasta, pinnaltaan rosoista kiviainesta. Murskeen mineraloginen koostumus on esitetty taulukossa 5 sekä eri lajitteiden seulontatulokset taulukossa 6. Murskeen tiheydeksi saatiin 2680 kg/m³.

Taulukko 5. Kiviainesten mineraloginen koostumus.

	Paraisten luonnon muovaama	Karhulan kalliomurske
Maasälvät + kvartsi	70 %	90 %
Kiille	10 %	10 %
Karbonaatteja	10 - 20 %	

Taulukko 6. Runkoainelajitteiden läpäisyarvot
normaaliseulasarjalla. M = murskelajite

runkoaineet	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	64
filleri	49.2	73.1	82.5	88.9	93.6	97.8	100	100	100	100
0-0.6	7.4	33.3	91.7	100	100	100	100	100	100	100
0.5-1	0.1	0.4	2.2	64.8	100	100	100	100	100	100
1-2	0	0	0.4	2.7	97.6	100	100	100	100	100
2-3	0	0	0.1	0.3	25.4	99.7	100	100	100	100
3-5	0	0	0	0.1	0.4	44.6	99.5	100	100	100
M 0-3	13.4	24.2	41.1	63.7	93.3	100	100	100	100	100
M 0-6	9.6	16.1	25.8	39.4	60.1	87.6	100	100	100	100
M 8-16	0.9	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	4.4	90.6	100	100
M 16-32	1.3	1.9	2.4	2.6	2.7	2.8	3.1	21.5	100	100
8-16	0	0	0	0	0	0	1.8	76.2	100	100
16-32	0	0	0	0	0	0	0	19.2	97.3	100

Kiviaineista määritettiin myös VTT:n koetusohjeiden mukaiset kulmikkuusluvut sekä muotoarvot, jotka on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7.

Kiviainesten raemuoto.

	kulmikkuus- luku R	puikkoisuus c:a	liuskeisuus b:a	muotoarvo 1: $\frac{b}{a}:\frac{c}{a}$
Parainen, 8-16 mm ja 16-32 mm	1,11	1,56	1,17	0,55
Karhula, 8-16 mm ja 16-32 mm	1,49	1,92	1,35	0,38

Kuvasta 9 nähdään luonnon muovaaman ja murskatun kiviaineksen erot raemuodossa ja pinnan karheudessa. Erityisesti kulmikkuudessa sekä pintastruktuurissa voidaan havaita selvä ero kuvan varjoja vertaamalla.



Kuva 9. Kiviaineslajitteet 8 - 16 mm.

Vasemmalla Paraisten luonnon muovaama,
oikealla Karhulan kalliomurske.

Vesi ja lisäaineet

Laboratoriokokeissa käytettiin Paraisten kaupungin vesi-johtovettä. Nesteytetyissä betonimassoissa käytettiin Oy Partek Ab:n toimittamaa melamiiniformaldehydi-pohjaista nesteytintä Melment L 10 sekä huokostetuissa betoneissa polyglykolieetterisulfonaattipohjaista huokostinta Parmix L.

8.2 Betonimassan valmistus ja massakokeet

Betonimassan kuivat aineosat punnittiin suhteitusten mukaisesti ja kaadettiin 150 dm³ suljettuun pakkosekoittimeen. Niitä sekoitettiin kaksi minuuttia, jonka jälkeen lisättiin vesi. Sekoitusaika tämän jälkeen oli kolme minuuttia. Huokostetuilla betoneilla huokostin lisättiin pieneen vesimäärään sekoitettuna noin 15 sekuntia veden lisäyksen jälkeen. Nesteytettyjä betonimassoja valmistettaessa lisättiin vesi kahdessa erässä. Ensin lisättiin noin 75 % vedestä ja minuutin sekoituksen jälkeen loput vedestä, johon nesteytin oli sekoitettu. Lopuksi sekoitettiin tilavuudeltaan 80 dm³ suuruista valuannosta vielä kahden minuutin ajan.

Tuoreesta betonimassasta määritettiin lämpötila (°C), painuma (cm), muodonmuutos aika (SVB), ilmamäärä (%) ja tiheys (kg/m³). Tietyille koemassoille mitattiin myös vajoama MO-kojeella. Määritykset tehtiin VTT:n betonitekniisiä koe-tusohjeita /3/ noudattaen. Koemassojen pumpattavuutta pyrittiin karkeasti arvioimaan silmämääräisesti tarkastelemalla ennen painumakokeen suorittamista nouseeko kartiomuotti itsestään massan paineesta ylöspäin. Mikäli muotin ja betonimassan yläreunojen korkeusero on pienempi kuin 5 mm, voidaan massan pumpattavuutta pitää huonona tai mahdolltomana. Veden erottumiskoe tehtiin 500 ml dekanterilasissa ja massan pintaan erottunut vesimäärä mitattiin yhden ja kolmen tunnin jälkeen.

8.3 Koekappaleiden valmistus, säilytys ja testaus

Puristuslujuudet määritettiin särmältään 150 mm:n kuutioista ja taivutusvetolujuudet sekä kutistumat 100 x 100 x 500 mm³:n prismoista. Koekappaleet valmistettiin VTT:n betoniteknillisiä koetusohjeita /3/ noudattaen. Kutistumat mitattiin kutistumanastoista, jotka oli valun yhteydessä upotettu prismojen päihin.

Kaikki koekappaleet säilytettiin ensimmäisen vuorokauden ajan suljetussa tilassa kosteuden haihtumisen estämiseksi, jonka jälkeen muotit purettiin. Lujuuskoekappaleet siirrettiin normaalisäilytykseen 95 % suhteelliseen kosteuteen ja kutistumakoekappaleet 50 % suhteelliseen kosteuteen ja 20°C lämpötilaan, jolloin samalla mitattiin kutistumamittausten nolla-arvo.

Puristuslujuudet määritettiin 7 ja 28 vuorokauden sekä taivutusvetolujuudet 28 vuorokauden iässä. Kutistumat mitattiin kerran viikossa 56 vuorokauden ajan. Lujuuksien ja kuivatiheyksien määritykset tehtiin standardin SFS 4474 mukaisesti.

9. TYÖMAAKOKEET

Työmaakokein pyrittiin selvittämään laboratoriokokeissa parhaimmiksi havaittujen betonimassojen käyttökelpoisuus työmaaolosuhteissa. Erityisesti huomiota kiinnitettiin pumpattavuuteen sekä kuljetuksen ja pumppauksen aiheuttamaan ilmamäärän pienenemiseen erityisesti lisähuokosteilla betonimassoilla. Kalliomurskeen käytön mahdollista vaikutusta tiivistyvyyteen pyrittiin arvioimaan silmämääräisesti valupintoja tarkastelemalla sekä määrittämällä Break-off laitteistolla rakennelujuuksia. Betonimassojen työstettävyyttä selvitettiin betonikokeiden lisäksi karsoittamalla työmaahenkilöstön tuntemuksia ja mielipiteitä massan laadusta.

9.1 Materiaalitiedot

Sideaineet

Kenttäkokeissa käytettiin Oy Partek Ab:n Paraisten tehtaan nopeasti kovettavaa Portland-sementtiä P 40/7. Kokeiden aikana sementtien 7 d lujuudet vaihtelivat välillä 41 - 43 MPa ja hienoudet pysyivät vakiona 485 m²/kg. Lentotuhka oli toimitettu Hanasaaren B-voimalaitokselta. Sen hiilen hehkutushäviö vaihteli 4 - 6 prosentin välillä.

Runkoaine

Kenttäkokeiden karkeana 8 - 16 mm:n kiviaineksena käytettiin kaikissa koemassoissa samaa kalliomursketta kuin laboratoriokokeissakin. Hienompana runkoaineena käytettiin luonnonfilleriä 0 - 2 mm sekä luonnonsoraa 0 - 8 mm, jonka karkein aines oli osittain murskattua. Luonnonkiviainesta korvattiin rakeisuudeltaan 3 - 8 mm:n sekä 0 - 3 mm:n kalliomurskelajitteilla. Kalliomurskeen mineraloginen

koostumus oli esitetty luvussa 8.1 taulukossa 5. Kivi-ainesten rakeisuudet on laskettu taulukkoon 8 kahden kuu-kauden koeajanjakson keskiarvoina. Taulukossa 9 on esitetty lajitteiden 0,125 mm:n seulan läpäisevän hienoaineksen rakeisuusjakaumat ja ominaispinta-alat.

Taulukko 8. Kenttäkokeiden runkoainelajitteiden läpäisyprosentit normaaliseulasarjalla.

Lajite	Läpäisyprosentti										H
	.125	.25	.5	1	2	4	8	16	32	64	
filleri	67	89	95	98	99	100	100	100	100	100	948
0-8 mm	5	11	28	51	69	84	98	100	100	100	646
0-4 mm	4	23	55	80	89	96	100	100	100	100	747
M8-16 mm	1	1	1	2	2	2	3	80	100	100	292
M3-8 mm	1	2	2	4	5	32	97	100	100	100	443
M0-3 mm	16	30	51	82	99	100	100	100	100	100	778
M = kalliomurske											

Taulukko 9. Kenttäkokeissa käytettyjen lajitteiden 0,125 mm läpäisevän hienoaineksen seulontatulokset ja ominaispinta-alat argon adsorptiomittausmenetelmällä.

Lajite	Läpäisyprosentti					H'	ominais- pinta-ala
	32	40	63	90	125 μ m		
filleri	21	32	54	83	100	290	1870 m ² /kg
0-8 mm	26	35	51	75	100	287	3510 m ² /kg
0-4 mm	16	21	29	51	100	217	2110 m ² /kg
murske	44	57	83	96	100	380	1740 m ² /kg

Vesi ja lisäaineet

Työmaakokeissa käytettiin kunnallisen vesijohtoverkoston vettä. Huokostetuissa koemassoissa käytettiin huokostinta Parmix L sekä nesteytetyissä massoissa tehonotkistinta Melment L 10/40. Kaikissa yleisbetoneissa ja huokostetuissa betoneissa käytettiin lisäksi notkistinta Parmix N. Kaikkia kyseisiä lisäaineita toimittaa Suomessa Oy Partek Ab.

9.2 Betonikokeet

Työmaakokeissa betonimassan valmistus tapahtui valmisbetoniasemalla tavanomaisella valmistustekniikalla. Vapaapudotussekoittimessa sekoitettujen annosten koko vaihteli 1 - 2,5 m³:n välillä, millä todettiin olevan vaikutusta huokostetun betonin ilman muodostumiseen.

Notkeuden mittaamiseen käytettävää sekoittimen sähköteho-mittaria eli kW-mittaria ei korkeammilla murskemäärillä voitu käyttää, sillä murskemassan suuremmasta sisäisestä kitkasta johtuen sen vaatimat sähkötehot olivat suurempia. Näin ollen normaalit kW/massan notkeus muuntotaulukot eivät pitäneet paikkaansa, vaan notkeuden säätö tapahtui silmämääräisesti. Tämä aiheutti koemassojen notkeuksissa pieniä vaihteluita, jotka on otettava huomioon keskinäisiä tulosvertailuja tehtäessä.

Jokaisen betonikokeen yhteydessä otettiin kiviaines-vaa'alta soranäyte, josta määritettiin humus, liete, kosteus sekä rakeisuusjakauma. Samoin tehtiin muidenkin lajitteiden kohdalla mikäli niiden ominaisuuksien epäiltiin muuttuneen merkittävästi. Kaikkien raaka-aineiden prosentuaaliset osuudet laskettiin todellisten punnittujen ainesosien mukaan eikä suhteitusten ohjearvojen mukaan. Näin pystyttiin määrittämään massojen todelliset koostumukset.

Ennen kuljetusta työmaalle massoista määritettiin laboratoriossa painuma, ilmapitoisuus, tuoretiheys sekä aloitettiin veden erottumiskoe. Massat kuljetettiin työmaalle pyörintäsäiliöautossa sitä kuitenkaan sekoittamatta, joten kuljetustapa vastasi allassäiliöautolla kuljetusta. Ennen purkausta massaa sekoitettiin pyörintäsäiliössä jonkin aikaa.

Koemassat siirrettiin muotteihinsa pääasiassa pumppaamalla Schwingin hydraulisella mäntäpumpulla. Putken halkaisija oli 100 mm ja se oli lähes kokonaisuudessaan metalliputkea. Pumppausmatkat olivat erittäin lyhyitä. Putkistopaineita seurattiin pumppauksen aikana sekä pumppaajan mielipiteitä massan pumpattavuudesta kirjattiin muistiin.

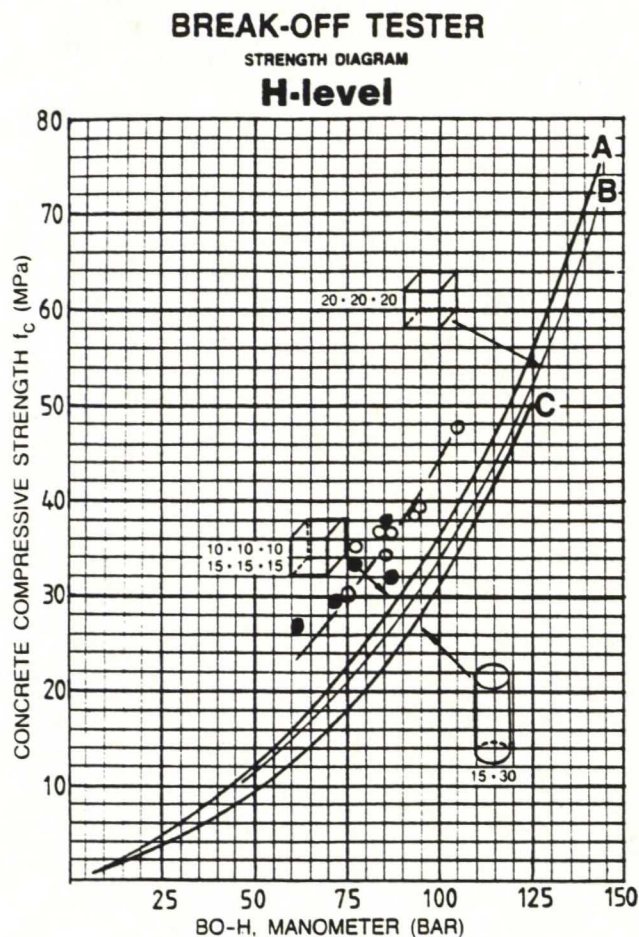
Pumppauksen jälkeen massasta määritettiin työmaalla lämpötila, painuma, ilmapitoisuus sekä arvioitiin silmämääräisesti sen työstettävyyttä. Työmaalla valmistettiin särmältään 150 mm:n kuutiot olosuhdekoekappaleiksi, joiden lujuuksiin Break-off laitteella määritettyjä rakennelujuuksia voitiin verrata. Lopuksi upotettiin koevalun pintaan 7 kpl muovimuotteja Break-off testausta varten. Normikoe-kappaleita varten osa massasta kuljetettiin takaisin valmisbetoniasemalle, jonka laboratoriossa valettiin vakioolosuhteissa särmältään 150 mm:n koekuutiot. Vuorokauden iässä ne siirrettiin normaaliin vesisäilytykseen. Puristuslujuudet määritettiin niistä 7 ja 28 vuorokauden ikäisinä. Viikon iässä määritettiin lisäksi rakennelujuudet Break-off laitteella sekä olosuhdekoekappaleiden puristuslujuudet.

9.3 Rakennelujuus Break-off laitteella

Sekä laboratorio- että kenttäkokeiden yhtenä osana testattiin betonin puristuslujuutta Break-off laitteella. Tällä osittain ainetta rikkovalle in-situ testillä saadaan betonin puristuslujuus määritettyä vertaamalla laitteen painearvoa diagrammiin, josta vastaava puristuslujuus on luettavissa.

Menetelmä perustuu tuoreeseen betonipintaan upotettavaan muovimuottiin, joka erityisellä ulosvetimellä myöhemmin poistettaessa jättää halkaisijaltaan 53 mm, 70 mm syvän lieriön kovettuneeseen betoniin. Tämä lieriö murretaan hydraulisesti Break-off laitteella ja sen katkaisemiseen tarvittava paine luetaan asteikolta. Liitteessä 2 on esitetty Break-off testaus tarkemmin.

Koevaluissa valukohteen tiivistettyyn betonipintaan upotettiin 4 - 7 muovimuottia joko käsin painaen tai varovasti tärysauvalla täryttäen. Samalla valettiin särmältään 150 mm:n koekuutiot, jotka tiivistettiin huolella ja säilytettiin kosteuden liiallisen haihtumisen estämiseksi muoteissaan samoissa olosuhteissa kuin valettava rakenne. Näin Break-off laitteen painearvojen ja olosuhdekuutioiden puristuslujuuksien välille saatiin määriteltyä yhteys, joka on pisteparvi kuvassa 10.



Kuva 10. Break-off diagrammi lujuusalueella 25 - 70 MPa. Tummat pallot vertailubetonin K40 arvoja. Vaaleat pallot murskebetonin arvoja murskemäärillä 50 - 100 %. A, B ja C valmistajan ohjekäyriä.

Kalliomurskemassojen tiivistyvyyttä tutkittiin sekä silmämääräisesti valupinnoista että Break-off laitteella. Mikäli massan tiivistyvyys on hyvä, oletettiin massan kuutiolujuuksien ja laitteen painearvojen avulla diagrammiin piirretyn pisteen sijoittuvan pisteparven tai sen läpi piirretyn regressiokäyrän tuntumaan. Tiivistyvyyden ollessa huono, jäivät alhaisemmasta rakennelujuudesta johtuen laitteen painearvot alhaisemmiksi ja diagrammiin piirretty piste jää regressiosuoran vasemmalle puolelle. Kuutiolujuuksiin ei huonon tiivistyvyyden oleteta vaikuttavan kuutioiden huolellisen tärytyksen vuoksi.

Kuvasta 10 havaitaan, ettei yhtään yksittäistä pistettä sijoitu näkyvästi pisteparven tai regressiosuoran vasemmalle puolelle eli rakenteen lujuus ei ole jäänyt samoissa olosuhteissa säilytettyjen koekuutioiden lujuutta heikommaksi. Näin ollen ei voida ainakaan tämän kokeen tulosten perusteella sanoa jonkun yksittäisen murskemassan tiivistyvyyden olevan ratkaisevasti huonompi kuin muiden. Hyviin tiivistyvyydestuloksiin vaikutti osaltaan se, ettei mitauspisteitä ollut mahdollista sijoittaa rakenteessa tiivistymisen kannalta kriittisimpiin kohtiin vaan valun pintaan. Vaikka joidenkin massojen välillä saattoi olla pieniä tiivistymiseroavaisuuksia, voidaan saatujen tulosten perusteella todeta tärytystyöllä olevan ensisijaisen tärkeä merkitys hyvän tiiviyn saavuttamiseksi.

Break-off laite todettiin helppokäyttöiseksi ja luotettavaksi, kunhan mittauspisteitä on riittävä määrä eli yli 5 kpl. Tällöin lasketulle keskiarvolle saadaan tilastollista varmuutta. Keskihajonta 6 - 7 mittauspisteen perusteella lasketuissa lujuuksissa oli noin 10 % sekä laboratorio- että kenttäkokeissa.

Alle 25 MPa:n lujuusluokille on laadittu vastaavasti oma L-level käyrästönsä, joka on luotettavampi alhaisemmilla lujuuksilla kuin kuvan 10 esittämät H-level käyrät.

10. NORMAALIT YLEISBETONIT

10.1 Yleisbetonin suhteitustiedot

Yleisbetonien K20 ja K40 suhteitusten pohjaksi otettiin Karhulan valmisbetonitehtaan kesällä 1987 käytössä olevat suhteitukset. Runkoaineen rakeisuuskäyrä, lentotuhkan prosentuaalinen osuus sementin määrästä sekä murskattu kiviaines olivat laboratoriokokeissa samoja kuin Karhulassa, sen sijaan sementtimäärää nostettiin hieman. Tämän vuoksi laboratoriokokeiden lujuustasot ovat korkeampia kuin työmaakokeissa. Laboratoriokokeiden tarkat suhteitustiedot on esitetty liitteessä 3 ja työmaakokeiden liitteessä 4.

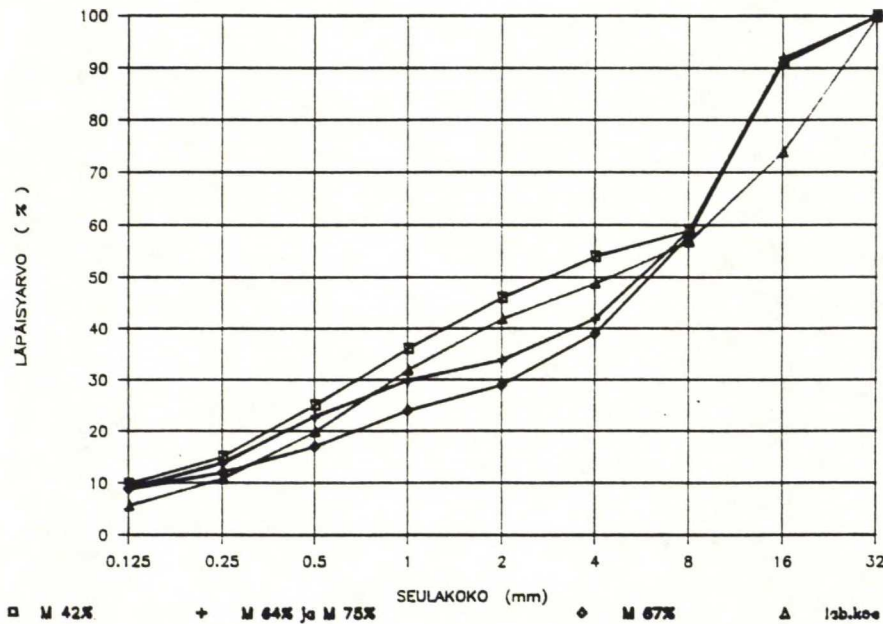
Luonnon muovaamaa kiviainesta ryhdyttiin korvaamaan kalliomurskeella alkaen karkearakeisimmasta lajitteesta, jonka ominaispinta-alan vaikutus veden tarpeeseen on pienin. Luonnonsoraa 0 - 8 mm korvattiin laboratoriokokeissa kivituhkalajitteilla 0 - 3 mm ja 0 - 6 mm sekä työmaakokeissa murskelajitteella 3 - 8 mm ja kivituhkalla 0 - 3 mm. Laboratoriossa tutkittavat kokonaismurskemäärät olivat 0 - 100 % ja valmisbetonitehtaalla 40 - 75 %. Lujuusluokassa K40 valmistettiin työmaakokeissa lisäksi yksi koe massa täysin luonnon muovaamaa kiviainesta käyttäen. Luonnonsoran sisältämää vähäistä murskemäärää ei kokonaismurskeprosentteja laskettaessa ole otettu huomioon.

Laboratoriokokeissa kalliomurskeen aiheuttama notkeuden pieneneminen kompensoitiin pelkästään veden lisäyksellä. Koska betonin taloudellisuus haluttiin säilyttää hyvänä, ei sementtimäärää lisätty. Tästä oli seurauksena murskemäärän kasvaessa vesisementtisuhteen suureneminen. Hienoainesta oli tarkoitus lisätä vasta kun työstettävyyys heikkenisi ja veden erottuminen muodostuisi ongelmalliseksi. Yhteenkään murskemassaan ei ylimääräistä hienoainesta tarvinnut lisätä, sillä vertailumassan

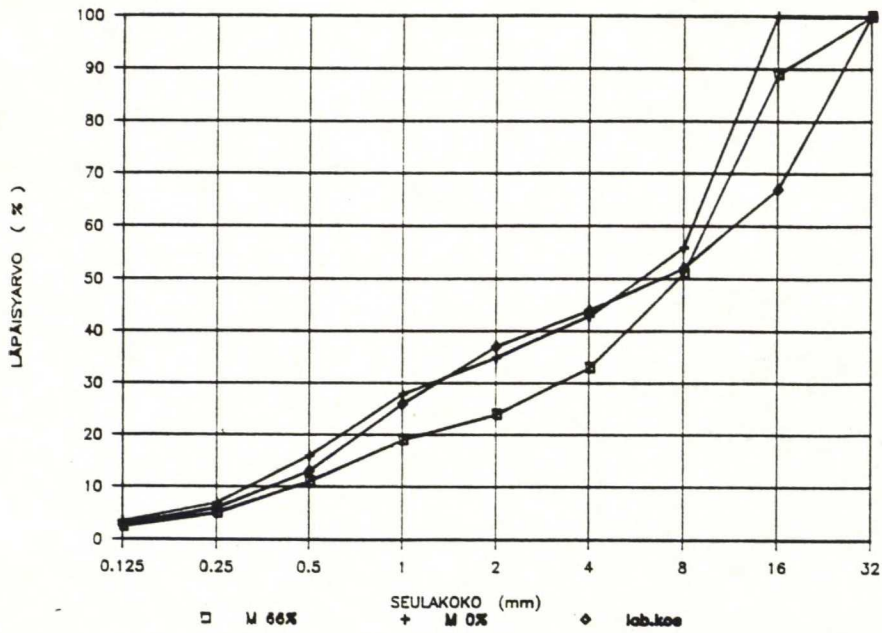
rakeisuusjakauma oli riittävän hieno murskemassoillekin. Murskemäärällä 70 % tehtiin koemassoja myös hienommalla rakeisuusjakaumalla. Lujuusluokassa K40 käytettiin kahdessa koemassassa lisäksi epäjatkuvarakeista runkoainetta.

Sementtimäärät ja vesisementtisuhteet olivat laboratorio- kokeissa lujuusluokassa K20 185 kg/m³ ja 0,91 - 1,03 sekä lujuusluokassa K40 290 kg/m³ ja 0,63 - 0,71. Vastaavat arvot työmaakokeissa olivat lujuusluokassa K20 150 kg/m³ ja 1,13 - 1,30 sekä lujuusluokassa K40 270 kg/m³ ja 0,67 - 0,77. Työmaakokeissa kaikki massat notkistettiin 0,5 %:n Parmix N annostuksella sementin määrästä.

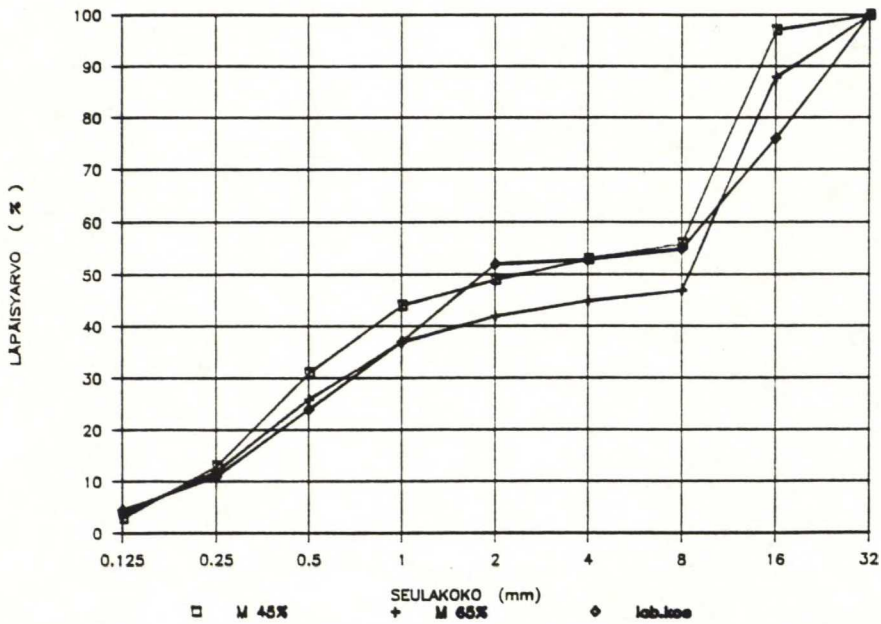
Kuvissa 11 - 13 on esitetty lujuusluokkien K20 ja K40 yhdistetyt runkoainerakeisuudet laboratorio- ja työmaakokeissa.



Kuva 11. Yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakaumat lujuusluokassa K20. Laboratoriokokeissa rakeisuusluku $H = 490$, työmaakokeissa murskemäärillä 42 % $H = 530$ (tuotantomassa), 64 % $H = 500$, 66 % $H = 480$ sekä 75 % $H = 500$.



Kuva 12. Yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakaumat lujuusluokassa K40. Laboratoriokokeissa $H = 450$, työmaakokeissa murskemäärillä 0 % $H = 490$, 50 % $H = 460$ (tuotantomassa), 65 % $H = 445$ sekä 75 % $H = 460$. Kuvassa työmaakokeiden hieno- ja karkearakeisin runkoaine.



Kuva 13. Yhdistetyn runkoaineen epäjatkuvat rakeisuusjakaumat lujuuskokeessa K40. Laboratoriokokeissa $H = 515$, työmaakokeissa murskemäärillä 45 % $H = 540$ ja 65 % $H = 500$.

Laboratoriokokeissa rakeisuusjakauma säilyi sekä lujuusluokassa K20 että K40 vakiona. Sen sijaan työmaakokeissa kokonaismurskemääriin 65 % ja 75 % pyrittäessä jäi runkoaineen rakeisuus usein haluttua karkeammaksi. Tämä johtui kalliomursketta 3 - 8 mm käytettäessä sen liian suuresta alemmasta nimellisrajasta. Rakeisuuden hienontamiseksi käytettiin 75 prosentin murskemäärällä lisäksi kivituhkaa 0 - 3 mm, jonka määrää jouduttiin myös rajoittamaan, ettei 0,125 mm:n läpäisyarvo olisi noussut liian suureksi.

Vaikka karkean ja hienon kiviaineksen suhdetta kirjallisuusviitteiden mukaan kehoitetaan murskemassoilla pienentämään, ei tätä tutkimuksessa tehty, sillä murskatun karkean kiviaineksen määrä 50 % ei kirjallisuusviitteen /12/ mukaan ole liian suuri.

10.2 Yleisbetonin laboratoriokokeiden tulokset

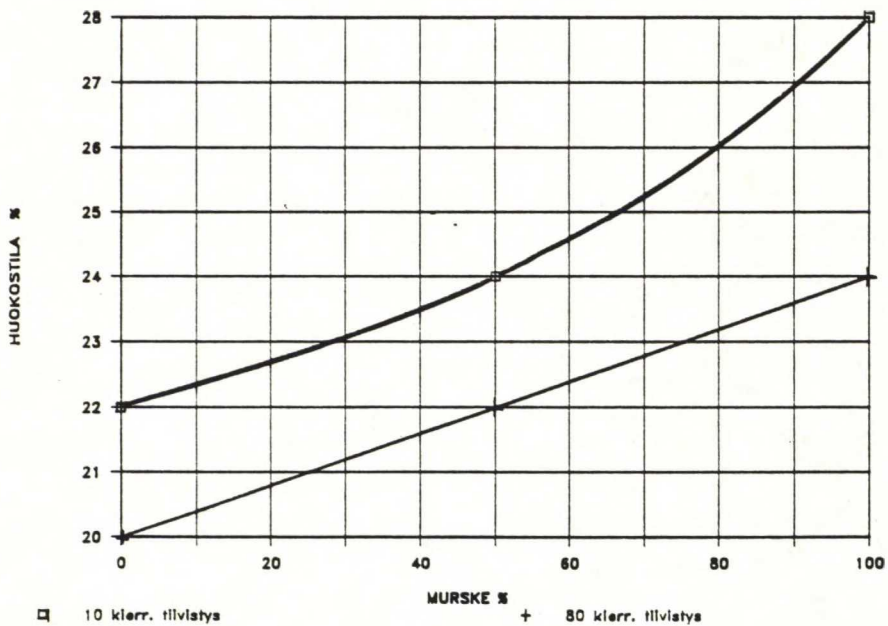
Karhulan kalliomurskeen määrän vaikutus betonin eri ominaisuuksiin tutkittiin laboratoriossa ja koetulokset on esitetty kuvissa 15 - 21. Kuviin on merkitty symbolilla E lujuusluokan K40 epäjatkuvarakeista runkoainetta käyttäen saadut koetulokset kalliomurskemäärillä 50 % ja 70 %. Runkoaineen rakeisuudeltaan hieman hienompien massojen koetulokset kalliomurskemäärällä 70 % on merkitty symbolilla H. Nämä koetulokset on merkitty ainoastaan, mikäli ne poikkeavat vastaavan normaalin jatkuvarakeisen betonin tuloksista.

Täydelliset laboratoriokokeiden tulokset on esitetty taulukkomuodossa liitteessä 5.

10.2.1 Runkoainekokeet

Kiviainesten fysikaaliset ominaisuudet oli esitetty luvussa 8.1 sekä niiden raemuodon ja pintastruktuurin ominaispiirteet kuvissa 3 ja 9.

Yhdistetyn runkoaineen tyhjätila lujuusluokan K20 rakeisuusjakaumalla määritettiin murskemäärillä 0 %, 50 % ja 100 % IC-tutkimuslaitteella. Tämän kokeen suoritus on kuvattu liitteessä 1. Tyhjätilan eli huokostilan riippuvuus kalliomurskemäärästä voitiin esittää kahdella eri IC-laitteen tiivistystyön arvolla: 10 ja 80 tiivistyskierrosta.

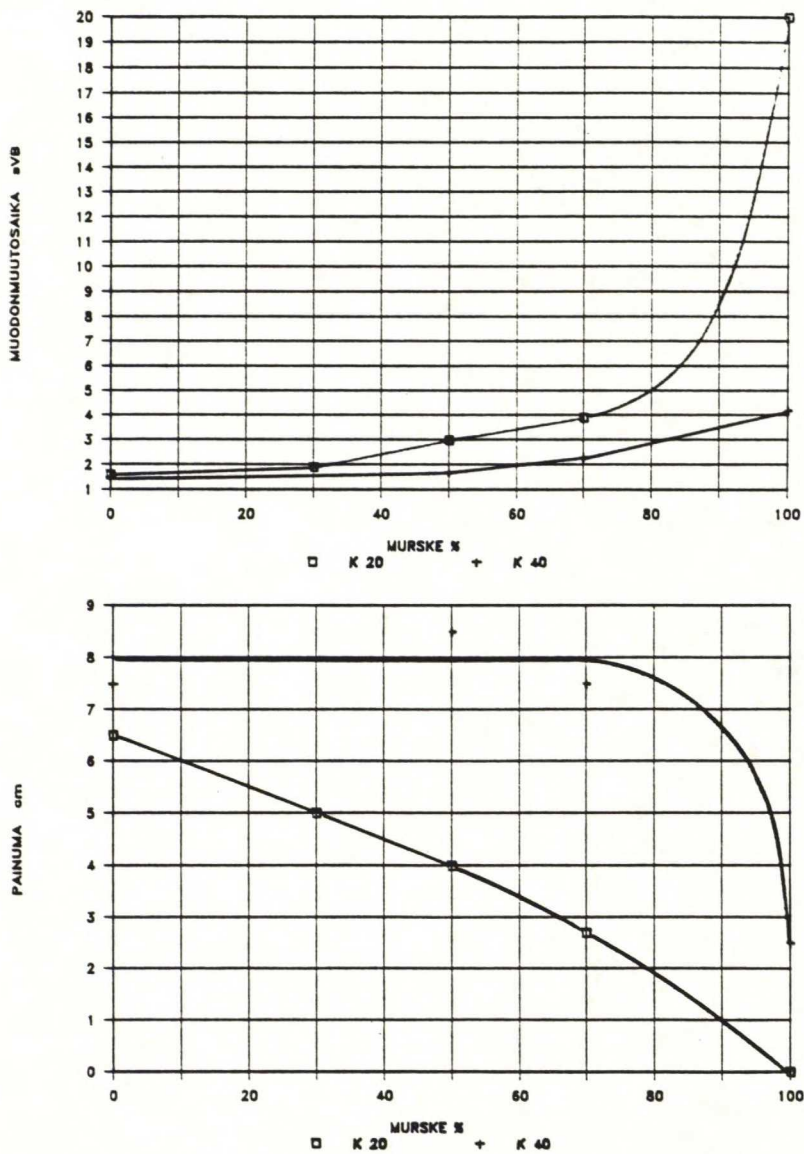


Kuva 14. Lujuusluokan K20 yhdistetyn runkoaineen huokostila murskemäärän funktiona IC-laitteen 10:n ja 80:n tiivistyskierroksen jälkeen.

Erimuotoisten murskerakeiden kulmikkuuden ja yhdistetyn runkoaineen tyhjätilan välistä korrelaatiota tarkastellaan luvussa 10.5.

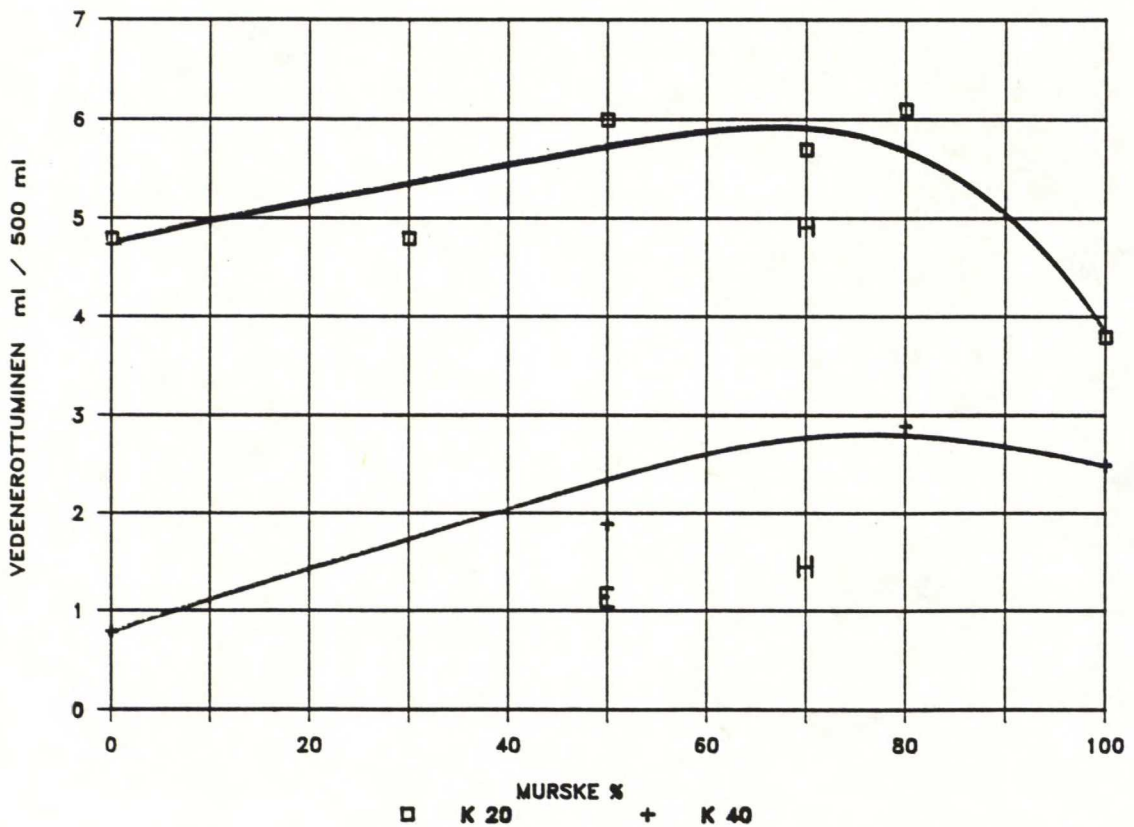
10.2.2 Betonimassan ominaisuudet

Kuvassa 15 on esitetty kalliomurskeen määrän vaikutus työstettävyyteen. Työstettävyyden mittana on käytetty betonimassan muodonmuutosaikaa ja painumaa.

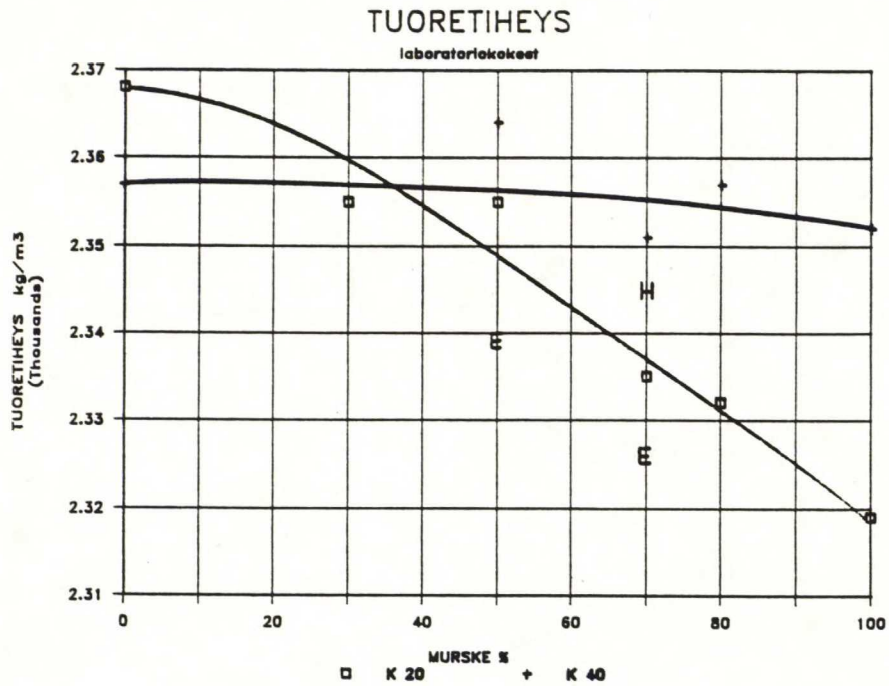


Kuva 15. Työstettävyyys murskemäärän funktiona lujuusluokissa K20 ja K40. Murskemäärä ainoa muuttuja.

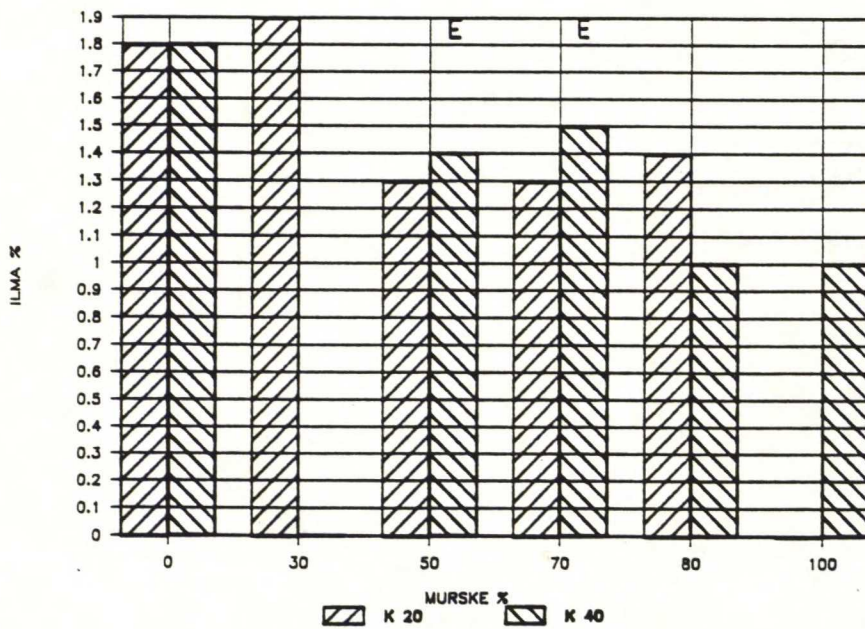
Kuvissa 16 - 18 on yleisbetonien massakokeista esitetty veden erottuminen, tuoretiheys sekä ilmapitoisuus kalliomurskemäärän funktiona lujuusluokissa K20 ja K40.



Kuva 16. Kolmen tunnin jälkeen massan pintaan erottuneen vesimäärän ja kalliomurskemäärän välinen korrelaatio lujuusluokissa K20 ja K40.



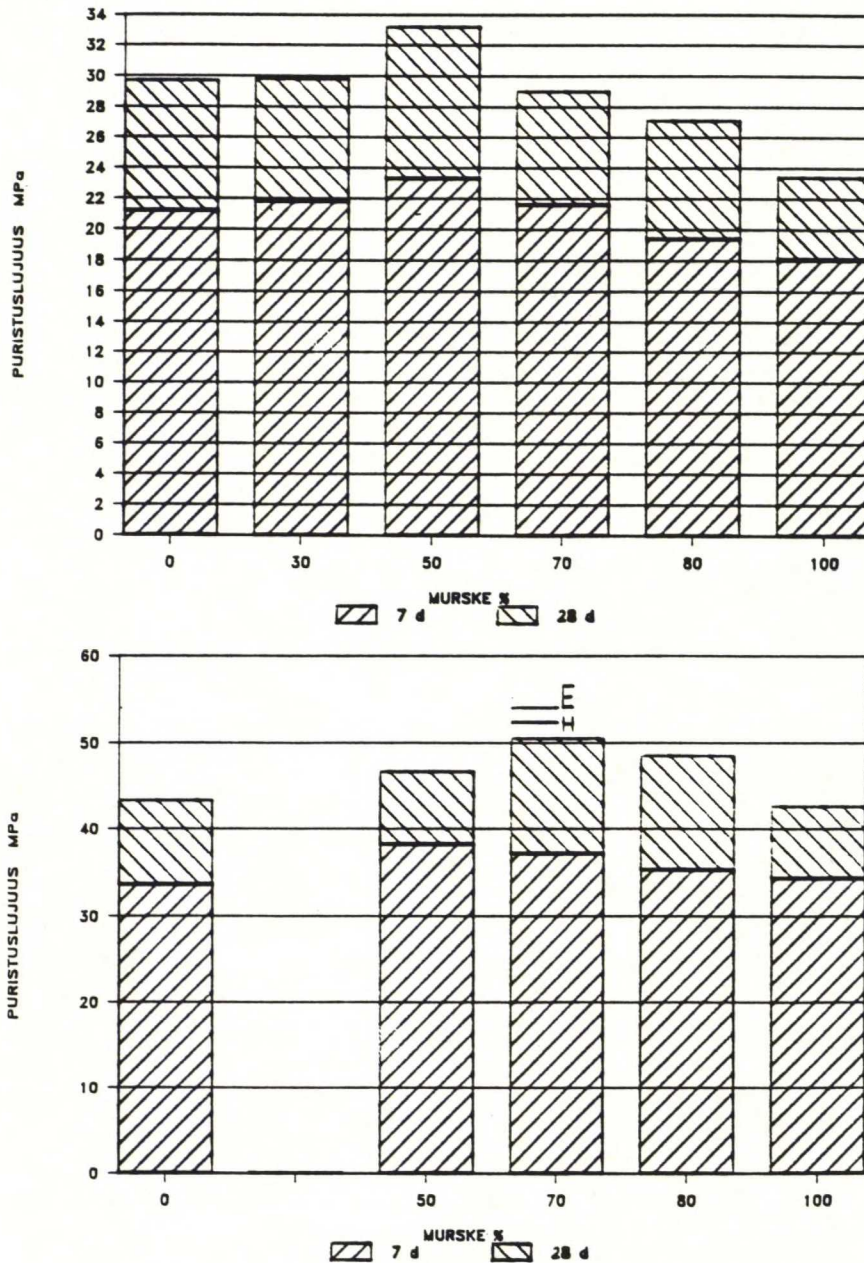
Kuva 17. Betonimassan tuoretiheyden riippuvuus kalliomurskeen määrästä lujuusluokissa K20 ja K40.



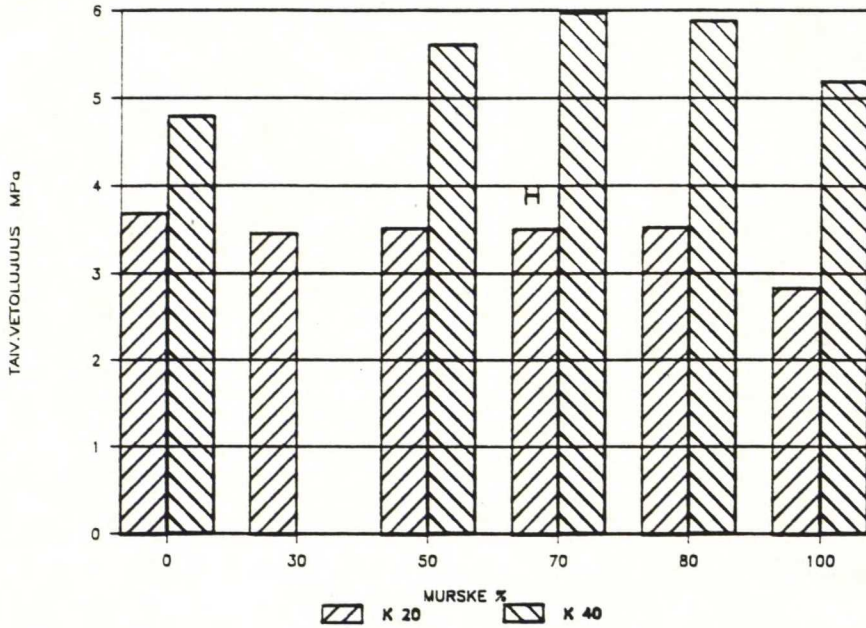
Kuva 18. Betonimassan ilmapitoisuus laboratorioskokeissa eri kalliomurskemäärillä lujuusluokissa K20 ja K40.

10.2.3 Kovettuneen betonin ominaisuudet

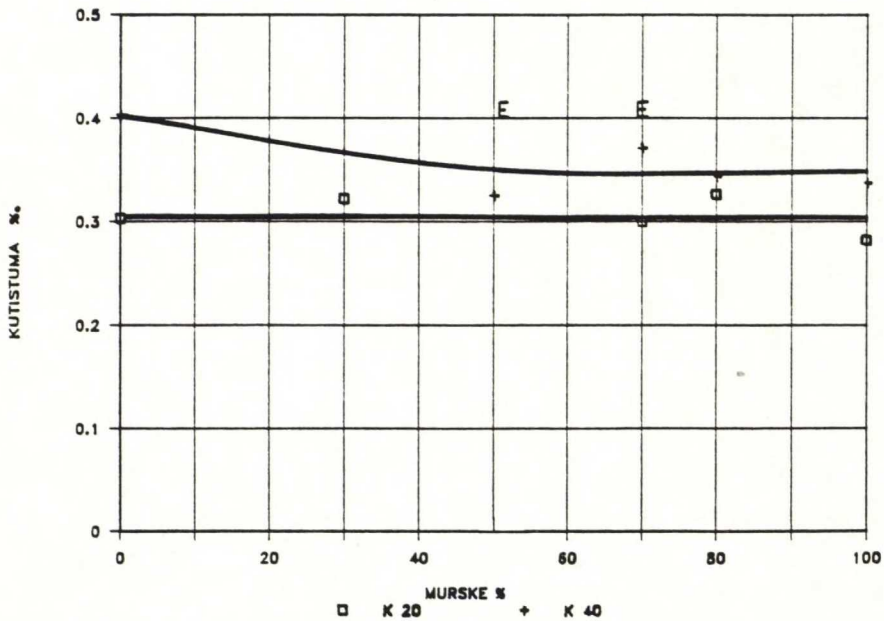
Yleisbetonien K20 ja K40 puristuslujuudet, taivutusvetolujuudet sekä kutistumat kalliomurskemäärän funktiona on esitetty kuvissa 19 - 21.



Kuva 19. Särmältään 150 mm:n kuution puristuslujuudet eri kalliomurskeen määrillä laboratoriokokeissa lujuusluokissa K20 (yllä) ja K40 (alla).



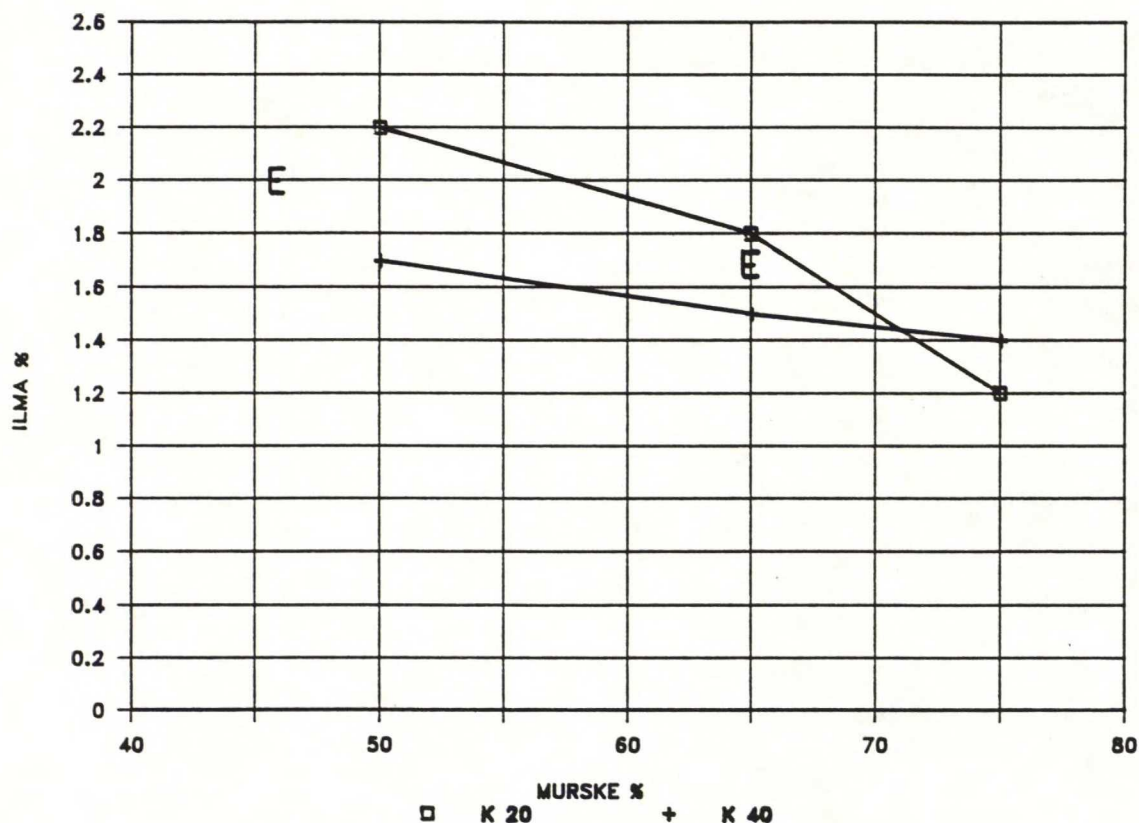
Kuva 20. Neljän viikon taivutusvetolujuudet eri kallio-murskemäärillä laboratorikokeissa lujuusluokissa K20 ja K40. Lujuusluokan K40 hienommalla rakei-suusjakaumalla saatiin 70 % murskemäärällä taivu-tusvetolujuudeksi 6,3 MPa.



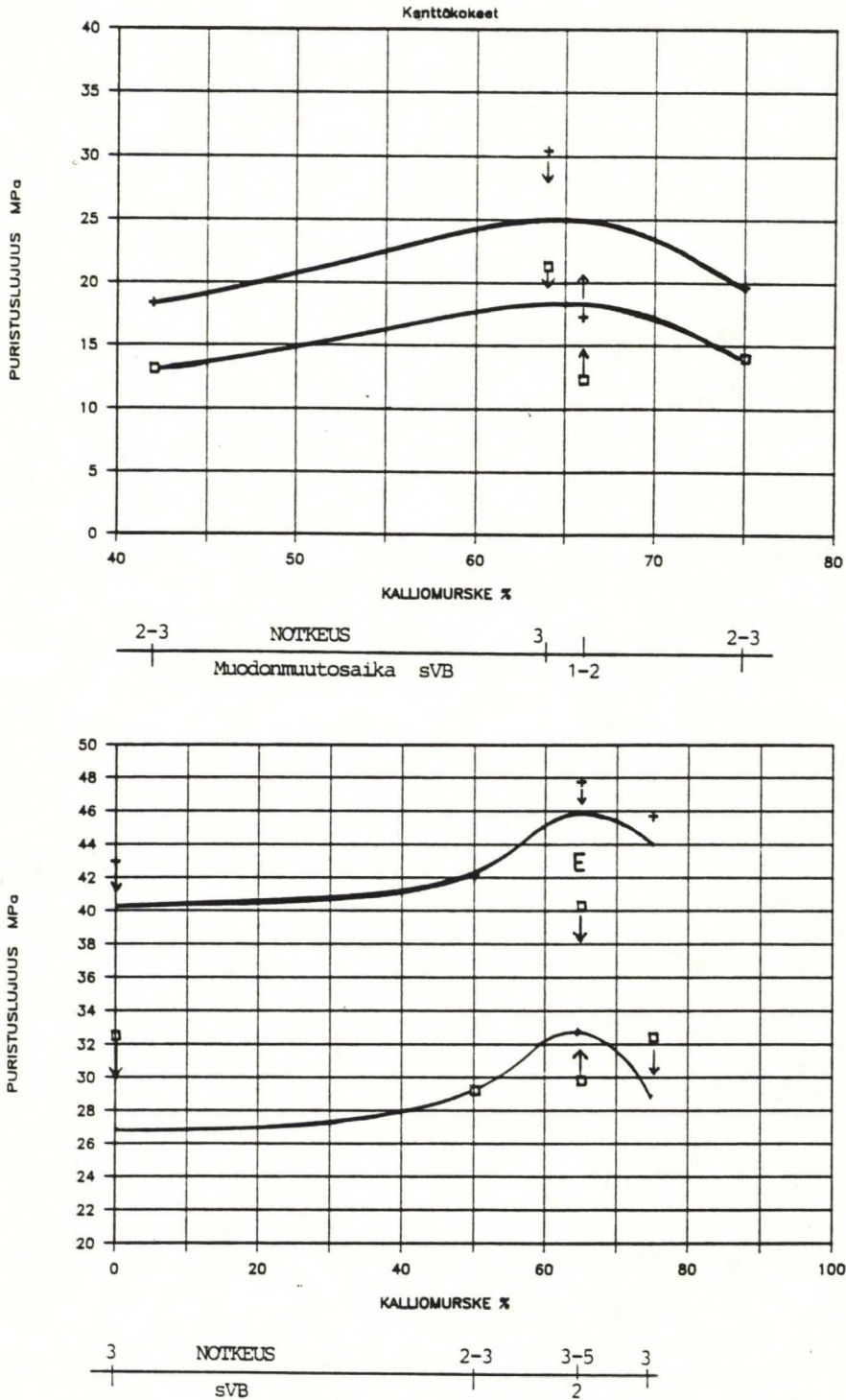
Kuva 21. Kahdeksan viikon hydrataatiokutistumat kallio-murskemäärän funktiona laboratorikokeissa lujuusluokissa K20 ja K40.

10.3 Yleisbetonien työmaakokeiden tulokset

Työmaakokeet tehtiin Karhulan valmisbetonitehtaalla, jossa tutkittiin laboratoriokokeissa parhaiksi havaittujen betonimassojen käyttökelpoisuus käytännössä. Kalliomurskeen lisäys aiheutti merkittävimmät muutokset ilmamääriin ja puristuslujuuksiin, kuten kuvista 22 ja 23 havaitaan. Kuviin on merkitty lujuusluokassa K40 epäjatkuvarakeista runkoainetta käyttäen saadut koetulokset symbolilla E. Muut tulokset työmaakokeista on esitetty taulukkomuodossa liitteessä 6.



Kuva 22. Betonimassan sekoituksen jälkeinen, ennen kuljetusta mitattu ilmamäärä kalliomurskemäärän funktiona lujuusluokissa K20 ja K40.



Kuva 23. Särmältään 150 mm:n kuution 7 ja 28 vuorokauden puristuslujuudet kalliomurskemäärän funktiona lujuusluokissa K20 (yllä) ja K40 (alla). Käyrät piirretty notkeusarvoilla korjattujen pisteiden kautta.

Kuten kuvasta 23 havaitaan eri murskemäärillä massojen notkeus ei pysy vakiona. Tämä hankaloittaa lujuusvertailua, sillä notkeudeltaan 2 - 3 sVB:n massan lujuusarvo on interpoloitava tai jopa arvioitava jäykemmän ja notkeamman massan lujuuksista. Osaa lujuusarvoista ei täten voida pitää absoluuttisen tarkkoina, mutta lujuuskehityksen suuntaviivat ovat kuitenkin selvästi havaittavissa.

Notkeuden vaihtelut johtuivat vaikeudesta säätää valmisbetonitehtaalla murskemassojen notkeus oikeaksi. Suuremmat murskemäärät aiheuttivat sisäisen kitkansa vuoksi suuremman sekoittimen pyörintävastuksen, eikä käytössä olevia sähkötehon ja massan notkeuden välisiä muuntotaulukoita, jotka oli laadittu noin 50 prosentin murskemäärälle, voitu sellaisenaan käyttää. Tästä johtuen työmaakokeissa massan notkeus säädettiin pääosin silmämääräisesti.

10.4 Yleisbetonien koetulosten tarkastelu

10.4.1 Runkoainekokeet

Yhdistetyn runkoaineen tyhjätila määritettiin IC-laitteella sekä 10 että 80 tiivistyskierroksen jälkeen liitteen 1 mukaisesti. Kymmenen tiivistyskierroksen työmäärä on näistä sopivampi tuomaan esiin runkoaineen tiivistymisominaisuudet. Runkoaineen muuttuessa luonnon muovaamasta kiviaineksesta Karhulan murskeeseen kasvoi tyhjätila 22 % -> 28 prosenttiin eli 60 l/m^3 (kuva 14). Tämä vastaa melko tarkasti kirjallisuudessa esitettyjä arvoja. Mikäli tiivistystyö on erityisen voimakasta eli 80 tiivistyskierrosta, vastaava tyhjätilan kasvu on 40 l/m^3 . Lisättäessä tiivistystyötä 10 -> 80 kierrokseen saatiin luonnon muovaaman kiviaineksen huokostila pienenemään 2 prosentin ja murskeen huokostila peräti 4 prosentin verran.

Ainoastaan mursketta runkoaineena käytettäessä on siis suuresta sisäisestä kitkasta johtuen vajaan tiivistymisen mahdollisuus vaarana, joka vältetään erittäin huolellisella tärytyksellä. Sen sijaan murskemäärällä 50 % eli mursketta ainoastaan karkeana runkoaineena käytettäessä saatiin runkoaine tiivistymään suhteessa paremmin ja pienemmällä tiivistystyöllä.

10.4.2 Betonimassakokeet

Laboratoriossa tutkittiin betonimassan työstettävyyttä vakioilla seossuhteilla kalliomurskemäärillä 0 - 100 %. Työstettävyyttä arvioitiin muodonmuutosajan, painuman sekä MO-kojeen vajoaman avulla. MO-kojeen todettiin lujuusluokassa K20 parhaiten kuvaavan todellista työstettävyyttä, sillä MO-iskujen lukumäärä oli murskemassoilla aina suurempi kuin luonnon muovaamaa kiviainesta käyttäen painuman pysyessä vakiona. Sekä painuma että muodonmuutosaika kuvasivat keskenään yhtä hyvin työstettävyyttä ja niiden riippuvuus toisistaan oli samankaltainen melkein kaikilla murskemäärillä. Lujuusluokan K20 korkeimmilla murskemäärillä muodonmuutosaika kuvanee työstettävyyttä kuitenkin paremmin kuin painuma. Painuma-arvo vastaa todellista työstettävyyttä paremmin lihavilla kuin laihoilla betonimassoilla.

Vakioilla seossuhteilla heikkeni lujuusluokassa K20 massan työstettävyyttä välittömästi kalliomurskeen lisäyksestä ja notkeus pieneni neljä notkeusluokkaa murskemäärän kasvaessa 0 -> 100 %:iin (kuva 15). Sen sijaan lujuusluokassa K40 murskemäärää voitiin suurentaa jopa 70 prosenttiin saakka, ennenkuin massan notkeus heikkeni. Tämä johtuu riittävän suuresta hienoainesmäärästä, jolloin kulmikkaat

karkeat murskerakeet eivät joudu liian voimakkaaseen raekosketukseen keskenään, eivätkä näin suurena massan sisäistä kitkaa. Lujuusluokassa K20 pienemmästä sementti- ja lentotuhkamäärästä johtuen kitkaiset raekosketukset muodustuivat hallitseviksi. Kalliomurskemäärällä 100 prosenttia heikkeni notkeus lujuusluokassa K40 1 - 2 luokan verran. Tämän perusteella voidaan sanoa kalliomurskeen soveltuvan työstettävyyden kannalta paremmin korkeammille lujuusluokille.

Kalliomurskeen aiheuttama työstettävyyden heikkeneminen kompensoitiin veden lisäyksellä taulukon 10 mukaisesti siten, että kaikille koemassoille saatiin vakio notkeus painuma-arvolla mitattuna. Karkean ja hienon kiviaineksen suhdetta ei murskemassoilla muutettu. Yhdistetyn runkoaineen rakeisuutta muutettiin työmaakokeissa vain, kun se hyvän työstettävyyden säilyttämiseksi oli välttämätöntä.

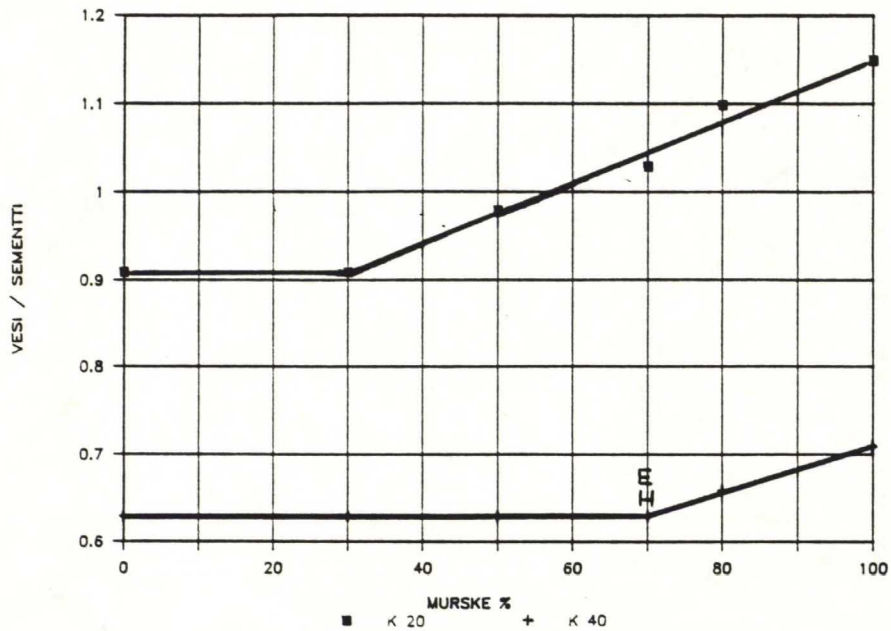
Taulukko 10. Vakionotkeuden 2 - 3 sVB säilyttämiseksi tehdyt veden lisäykset (l/m³) laboratorikokeissa.

Lujuusluokka	Murskemäärä %					
	0	30	50	70	80	100
K20	-	0	11	15	29	36 l/m ³
K40 - jatkuvarak.	-	-	0	0	9	19 l/m ³
- epäjatk.rak.			0	9		
- hienorak.				5		

Vakionotkeuden säilyttämiseksi murskemassat vaativat lisävettä keskimäärin 10 l/m³ yhtä notkeusluokkaa kohden.

Lujuusluokassa K20 sementtiliimamäärä on melko pieni. Tästä syystä jo pienetkin murskemäärät eli pienikin tyhjätilan kasvu aiheuttavat välittömän veden lisäyksen tarpeen. Sen sijaan lujuusluokassa K40 riittää ylimäärin voitelevaa sementtiliimaa runkoainerakeiden väliin suuremmillakin tyhjätilan arvoilla. Raekoon pienentyessä kasvaa murskeen suuremman ominaispinta-alan merkitys veden tarpeeseen. Tästä johtuu tyhjätilan kasvuun verraten suhteellisesti suuremmat vesimäärät murskemäärän ylittäessä 70 prosenttia.

Sementin määrän pysyessä vakiona, kasvoivat vesisementtisuhteet lujuusluokassa K20 0,91 -> 1,16 ja K40 0,63 -> 0,71, kun kalliomurskemäärä kasvoi 0 -> 100 prosenttiin (kuva 24). Runkoaineeltaan epäjatkuvarakeiset ja hienompirakeiset K40 betonimassat vaativat lisävettä enemmän kuin jatkuvarakeiset massat. Tosin vesisementtisuhteen kasvu oli niin pieni, ettei sillä ollut suurta merkitystä lujuuksiin.



Kuva 24. Vesisementtisuhte kalliomurskemäärän funktiona laboratorio- ja työmaakokeissa. Notkeus vakio, vesimäärä ja murskeprosentti ainoat muuttujat.

Vesimäärän lisääntyessä kasvoi myös betonimassan pintaan erottuneen veden määrä. Sekä laboratorio- että työmaakokeissa lujuusluokan K20 massan veden erottuminen oli 2 - 4-kertaista K40:een verrattuna. Massan K40 veden erottuminen kasvoi murskemäärän kasvaessa suhteellisesti paljon, ollen absoluuttiselta määrältään kuitenkin vähäistä ja merkityksetöntä. Massan K20 veden erottumisen kasvu oli vähäistä, eikä sen määrä muodostunut ongelmalliseksi.

Molemmissa lujuusluokissa veden erottuminen saavutti suurimman arvonsa 70 - 80 %:n murskemäärällä. Tätä suuremmilla arvoilla erottuminen pieneni, lujuusluokassa K20 suuremmasta fillerimäärästä johtuen erittäin voimakkaasti. Tämä johtui 0 - 3 mm:n kivituhkan murskefilleriosuuden erittäin hienosta rakeisuudesta ja sen suuresta ominaispinta-alasta. Työmaakokeissa veden erottumisen

todettiin murskemäärillä 0 - 80 % olevan riippuvainen pääasiassa runkoaineen rakeisuusjakaumasta, erityisesti fillerin määrästä ja laadusta sekä rakeisuuden vaatimasta vesimäärästä, ei suoranaisesti murskemäärästä. Veden erottuminen on siis hallittavissa, eikä sitä voida pitää esteenä kalliomurskeen käytölle. Runkoaineeltaan epäjatkuvarakeisten sekä hienompirakeisten massojen veden erottuminen oli odotetusti vähäisempää.

Tuoretiheydet pienenivät laboratoriokokeissa lujuusluokassa K20 murskemäärän kasvaessa, kun runkoaineisuus pieneni ja vesimäärä kasvoi. Massoilla K40 tuoretiheydet pysyivät lähes ennallaan, koska suuremman vesimäärän ja pienemmän ilmamäärän vaikutukset tuoretiheyteen kompensoivat toisensa, kuva 17. Runkoaineeltaan epäjatkuvarakeisten massojen K40 tuoretiheydet olivat alhaisempia johtuen pääasiassa niiden suuremmista ilmapitoisuuksista.

Laboratoriokoemassojen ilmapitoisuudet pienenivät 2 -> 1 prosenttiin, kun murskemäärä kasvoi 0 -> 100 %, kuva 18. Tämä johtui pääasiassa hienojakoisen murskefillerin eli murskepölyn ilmahuokosia täyttävästä vaikutuksesta eli murskepöly toimi tiivistävänä aineena. Pienemmillä murskemäärillä murskepölyä tuli betonimassaan isompien murskerakeiden pintaan kiinnitarttuneena. Työmaakokeissa ilmapitoisuudet pienenivät lujuusluokassa K20 1 %:n ja K40 0,3 %:n verran murskemäärän kasvaessa 50 -> 75 prosenttiin, kuva 22. Kuljetus ja pumppaus pienensivät ilmapitoisuuksia alle 0,5 %. Runkoaineeltaan epäjatkuvarakeisten murskemassojen ilmapitoisuudet olivat odotetusti korkeampia, koska ne sisälsivät ilman muodostumisen kannalta hyödyllisintä hienoa hiekkaa huomattavasti enemmän kuin vastaavat jatkuvarakeiset massat, jolloin 1 mm:n seulan läpäisyprosentti oli 10 -15 % suurempi.

Vaikkakin murskemassat olisivat notkeudeltaan samaa luokkaa kuin luonnon muovaamaa kiviainesta käyttäen, havaitaan niiden käyttäytymisessä eroja. Murskemassojen muokautuvuuden voidaan sanoa olevan hieman huonompi, vaikka sen notkeus ja koossapysyvyys olisivatkin yhtä hyviä kuin luonnonkiviaineksella. Se on luonteensa mukaisesti kivisen näköistä, mutta tiivistyy normaaleissa rakenteissa Break-off laitteella tehtyjen rakennekokeiden perusteella melko hyvin. Tiheästi raudoitetuissa rakenteissa on mahdollisuus kivitasaumien muodostumiseen raudoitteiden väliin. Murskemassat vastustavat suuremman sisäisen kitkansa vuoksi pakotettua liikettä enemmän, eivätkä siirry ja liiku muoteissaan yhtä helposti, kuten vajoaman mittaustaus MO-kojeella osoitti. Erot eivät kuitenkaan hyvin suhteitetulla massalla ole suuria, harvemmin edes havaittavissa. Työmaakokeissa murskemäärän lisäystä ei useinkaan työmaahenkilöstö edes huomannut, eikä massoja ker- taakaan heidän toimestaan arvosteltu huonoiksi. Huolellisen tärytyksen merkitys rakenteen tiiveydelle on kuitenkin niin tärkeä, ettei kyseisillä seikoilla sen rinnalla ole paljonkaan merkitystä, ellei rakenne ole tiivistyksen kannalta erityisen hankala. Tällöin pitäisikin valita normaalin yleisbetonin sijasta nesteytettyä lisäainebetonia.

10.4.3 Kovettuneen betonin kokeet

Rothfuchsin /31/ mukaan murskattua kiviainesta käytettäessä on mahdollisuus käyttää alemmissa lujuusluokissa K20 0,13 ja ylemmissä lujuusluokissa K40 0,07 yksikköä suurempia vesisementtisuhteen arvoja saman lujuuden saavuttamiseksi. Laboratoriokokeissa tämän suuruinen vesisementtisuhteen kasvu oli betoneilla K20 murskemäärällä 70 % ja K40 murskemäärällä 100 %, kuva 24.

Kuten kuvasta 19 voidaan havaita, on näillä murskemäärillä puristuslujuus yhtä suuri kuin luonnon muovaamaa runkoainetta käyttäen. Vesisementtisuhteen arvo murskebetoneilla on kuitenkin pitkälti riippuvainen rakeisuudesta ja raemuodosta. Erimuotoisten murskeiden vesisementtisuhteita ja lujuuksia on tarkasteltu luvussa 10.5.

Parhaat lujuusarvot saavutettiin kyseisiä murskemääriä pienemmillä arvoilla, joissa erityisesti karkean murskeen lujuutta lisäävä vaikutus on suhteessa voimakkaampi kuin suurentuneen vesisementtisuhteen lujuutta alentava vaikutus. Taulukossa 11 on esitetty puristuslujuuden muutokset laboratoriokokeissa murskemäärän kasvaessa.

Taulukko 11. Kuukauden puristuslujuuksien prosentuaaliset muutokset eri kalliomurskemäärillä laboratoriokokeissa.

Lujuusluokka	30 %	50 %	70 %	80 %	100 %
K20	0	+ 8	- 2	- 9	-21 %
K40		+ 8	+17	+12	- 2 %
- epäjatk.rak.		+24	+23		
- hienompirak.			+21		

Myös lujuuksien kannalta voidaan todeta kalliomurskeen käytön soveltuvan paremmin suuremmille, paljon voitelevaa hienoainesta sisältäville lujuusluokille. Parhaat puristuslujuusarvot saavutettiin betonilla K20 50 %:n ja K40 70 %:n murskemäärällä. Tällöin puristuslujuus kasvoi 8 % ja 17 %. Täysin murskeesta koostuvan betonin K20 lujuus pieneni jopa 21 % ja työstettävyydeltään se oli erittäin kivistä. Hyvän työstettävyyden ja sisäisen koheesion palauttamiseksi hienon runkoaineen määrän lisäys olisi todennäköisesti edelleen pienentänyt lujuutta.

Runkoaineeltaan epäjatkuvarakeisilla betoneilla K40 saatiin laboratoriokokeissa parempia lujuustuloksia kuin jatkuvarakeisilla. Erityisesti murskemäärällä 50 % eli ainoastaan karkean kiviaineksen ollessa mursketta suurensi epäjatkuvan rakeisuuden käyttö jopa 24 % puristuslujuutta luonnon muovaamaan runkoaineeseen verrattuna ja 15 % vastaavaan jatkuvarakeiseen runkoaineeseen verrattuna. Hieman hienompien rakeisuusjakaumien käytöllä ei lujuushajonnat huomioon ottaen ollut merkittävää vaikutusta lujuuksiin.

Taivutusvetolujuuksien arvot olivat 11 - 12 % vastaavien puristuslujuuksien arvoista, kuva 20. Niiden kehitys murskemäärän funktiona myötäili puristuslujuuksien kehitystä. Betonin K40 taivutusvetolujuudet kasvoivat murskemäärän kasvaessa suhteessa hieman enemmän kuin puristuslujuudet. Lujuusluokassa K20 tätä ei ollut havaittavissa. Rakeisuudeltaan epäjatkuvalle sekä hienommalla rakeisuudella ei ollut merkittävää vaikutusta taivutusvetolujuuksiin. Kirjallisuuden mukaista murskebetonien huomattavaa taivutusvetolujuuden suhteellista kasvua ei laboratoriokokeissa saavutettu.

Työmaakokeissa oli laboratoriokokeista poiketen käytössä myös murskelajite 3 - 8 mm, jonka käyttö aiheutti murskemassojen rakeisuuksissa vaihteluja. Tällä oli jonkin verran vaikutusta lujuuksiin, joka on otettava huomioon tuloksia vertailtaessa. Normaaleissa tuotantomassoissa käytettiin karkeana runkoaineena kalliomursketta lujuusluokassa K20 noin 42 % ja K40 50 %. Puristuslujuuksien nostamiseksi korvattiin luonnonsoraa 0 - 8 mm murskelajitteella 3 - 8 mm niin paljon, kuin se hyvän työestetävyyden puitteissa oli mahdollista. Todettiin, että maksimi kokonaismurskemäärä oli tällöin 60 - 65 %. Mikäli lajitteen 3 - 8 mm alempi nimellisraja olisi ollut alhaisempi, kuten 1 mm, olisi ollut mahdollista käyttää lujuusluokasta riippuen jopa 70 - 80 %:n kokonaismurske-

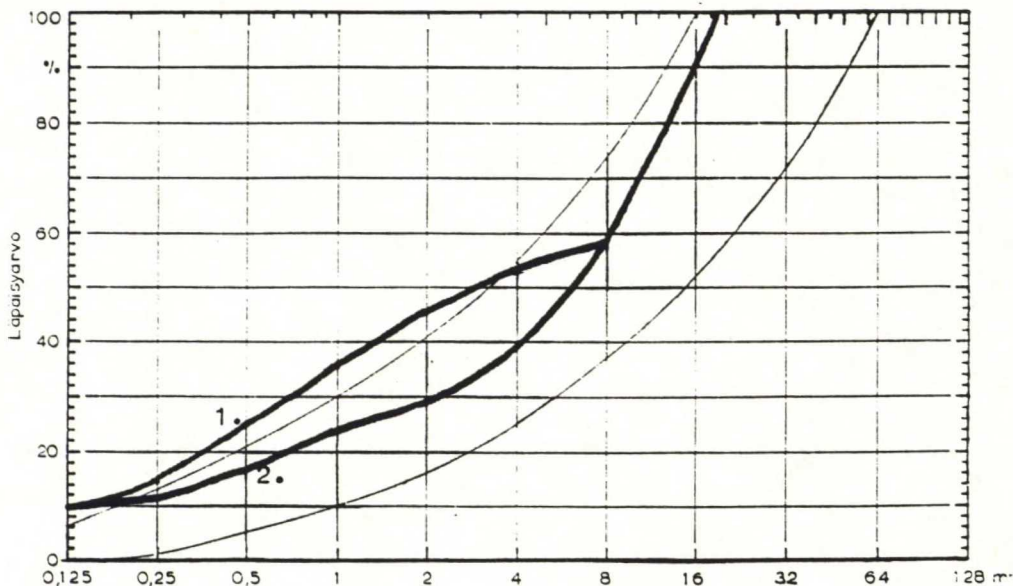
määrää ilman, että rakeisuuskäyrä olisi laskenut liian alas. Tämä olisi todennäköisesti edelleen parantanut lujuuksia. On otettava huomioon, että työmaakokeiden luonnon muovaama runkoaine oli laadultaan erinomaista, filleriosuus hienorakeista ja ominaispinta-alaltaan pientä. Mikäli filleriosuus olisi ollut laadultaan huonoa ja määrältään riittämätöntä, ei kyseisiin kokonaismurskemääriin olisi päästy, eikä näin karkeaa rakeisuusjakaumaa olisi voitu murskebetoneissa käyttää.

Parhaat puristuslujuudet työmaakokeissa saatiin murskemäärällä 65 %, joka lujuusluokassa K40 vastaa laboratoriokeiden tuloksia, kuva 23. Sen sijaan lujuusluokassa K20 valmisbetonitehtaan massoissa voitiin käyttää lujuusoptimin saavuttamiseksi myös hienona runkoaineena kalliomursketta. Tämä johtui mahdollisuudesta käyttää lajitetta 3 - 8 mm, jonka pieni ominaispinta-alan kasvu ei juuri vaikuta vedentarpeeseen, toisin kuin laboratoriokeiden kivituhkalla 0 - 3 mm ja 0 - 6 mm.

Toinen syy pienempään veden tarpeeseen on karkeampi rakeisuusjakauma, kuva 11. Ainoastaan luonnonsoraa hienona runkoaineena käytettäessä liian hienorakeinen luonnonsora tekee yhdistetystä runkoaineesta liian hienorakeista ja kiviaineksen 3 - 8 mm vähäisyys rakeisuuskäyrästä lievästi epäjatkuvan. Epäjatkuvarakeinen runkoaine soveltuu kuitenkin paremmin korkeammille lujuusluokille. Karkean runkoaineen osuus olisi epäjatkuvarakeisella massalla oltava lisäksi suurempi eli epäjatkuvuusaukko 40 - 50 läpäisyprosentin kohdalla.

Sen lisäksi, että ainoastaan karkean ja hienon runkoaineen keskinäisiä suhteita voidaan säädellä, mahdollistaa 3 - 8 mm:n kalliomurskeen käyttö rakeisuuskäyrän muodon säätelyn myös hienomman runkoaineen osalta. Tällöin saadaan rakeisuuskäyrän alaosa halutun muotoiseksi luonnonfillerin 0 - 2 mm, luonnonsoran ja kalliomurskeen 3 - 8 mm tai 1 - 8 mm avulla. Näin kiviainestoimittajan ei tarvitsisi lisätä hienorakeiseen luonnonsoraan summittaisesti karkeampaa ainesta, vaan se tehtäisiin valvotusti valmisbetonitehtaalla.

Kuvassa 25 murskemäärällä 65 % käytetty luonnonsora oli vieläkin hienorakeisempaa kuin tuotantomassassa, joka sisälsi 42 % mursketta. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut paljolti yhdistetyn rakeisuuskäyrän muotoon eli kalliomursketta 3 - 8 mm käyttäen ei luonnonsoran rakeisuusvaihteluilla ole ratkaisevaa merkitystä ja luonnonsoran hienorakeisuus on jopa eduksi murskeen käyttömahdollisuuksia ajatellen.



Kuva 25. Tuotantobetonin (nro 1, H = 540, 42 % mursketta) ja lujuudeltaan parhaan betonin (nro 2, H = 480, 65 % mursketta) yhdistetyt rakeisuuskäyrät lujuusluokassa K20 työmaakokeissa.

Kokonaismurskemäärällä 75 % käytettiin työmaakokeissakin kivituhkaa 0 - 3 mm, jotta rakeisuus säilyisi tarpeeksi hienona. Sen suuri ominaispinta-ala nosti veden tarvetta niin, että lujuudet pienenevät takaisin tuotantomassojen lujuustasoille eli murskemäärillä aikaansaatu lujuuden lisäys menetettiin. Lujuusluokassa K40 murskemäärällä 75 % saavutettiin kuitenkin korkeampia lujuuksia kuin ilman mursketta.

Kivituhkan käyttö fillerimäärän lisäämiseksi on valmisbetonissa mahdollista, joskin se useimmiten pienentää lujuuksia. Lujuuden laskua voidaan kuitenkin kompensoida käyttämällä karkeana runkoaineena murskelajitteita. Lujuusluokassa K20 saattaa massasta tulla tällöin liian kivistä ja rakeisuuden hienontaminen aiheuttaa vesi- ja sementtimäärän kasvun. Lujuusluokassa K40 betonimassa sen sijaan säilyttää kivituhkan lisäyksenkin jälkeen hyvän työstettävyytensä. Tämä tekee kivituhkan käytön taloudellisemmaksi K40:ssä kuin K20:ssä, kun rakeisuuden hienontamiseen ei ole tarvetta.

Valmisbetonitehtaalla käytettiin runkoaineena muutaman viikon ajan pelkästään luonnon muovaamaa kiviainesta. Lujuusseurannasta havaittiin, että lujuustaso pieneni verrattuna normaaliin tuotantomassaan, jossa karkea kiviaines oli mursketta. Samansuuntainen koetulos saatiin betonin K40 työmaakokeiden koesarjasta, kuva 23.

Murskebetonien hydrataatiokutistumia tutkittiin laboratoriokeissa, kuva 21. Kutistumien ei vastoin kirjallisuusviitteiden tietoa todettu kasvavan sementtilaastin tai vapaan vesimäärän lisääntyessä. Kutistumat 56 d iässä olivat lujuusluokassa K20 noin 0,3 o/oo murskemäärästä riippumatta sekä lujuusluokassa K40 noin 0,35 - 0,4 o/oo jopa hieman pienentyen murskemäärän kasvaessa. Runkoaineeltaan epäjatkuvarakeisen betonin K40 kutistuma oli

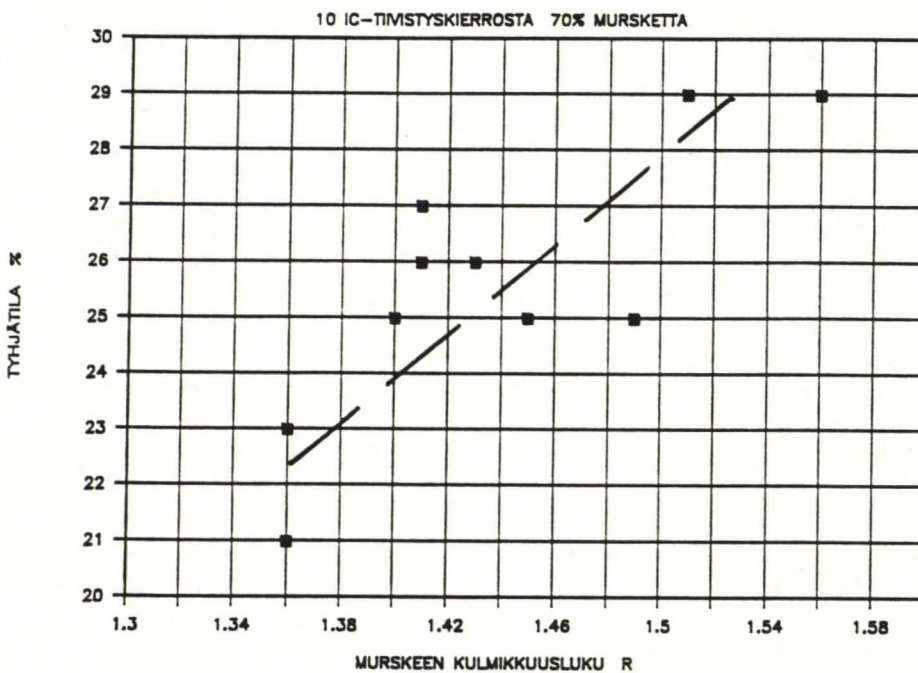
suuremmasta vesimäärästä johtuen hieman suurempi kuin vastaavalla jatkuvarakeisella betonilla. Kalliomurskeen voidaan todeta rajoittavan fysikaalisilla ominaisuuksillaan erittäin hyvin sementtikiven suurempaa kutistumista. Betonin kutistumiin ei siis murskemäärillä havaittu olevan suurtakaan merkitystä. Murskerakeen raemuodon muuttuessa yhä kulmikkaammaksi voidaan ajatella lisääntyneen vesimäärän vaikutuksen ja suurentuneen kulmikkuuden vaikutuksen kutistumaan kompensoivan kutakuinkin toisensa. Näin kutistuma riippuu enemmänkin runkoaineen rakeisuusjakauman ja betonin osa-aineiden laadun vaikutuksesta veden tarpeeseen.

10.5 Muilla murskeilla tehdyt kokeet

Kymmenellä erimuotoisella murskeella suoritettiin koesarja, jossa tutkittiin niiden kulmikkuus, liuskeisuus ja puikkoisuus, sekä näiden vaikutus betonin ominaisuuksiin. Erityisesti haluttiin selvittää murskeiden erilaisten raemuotojen vaikutus lujuuteen.

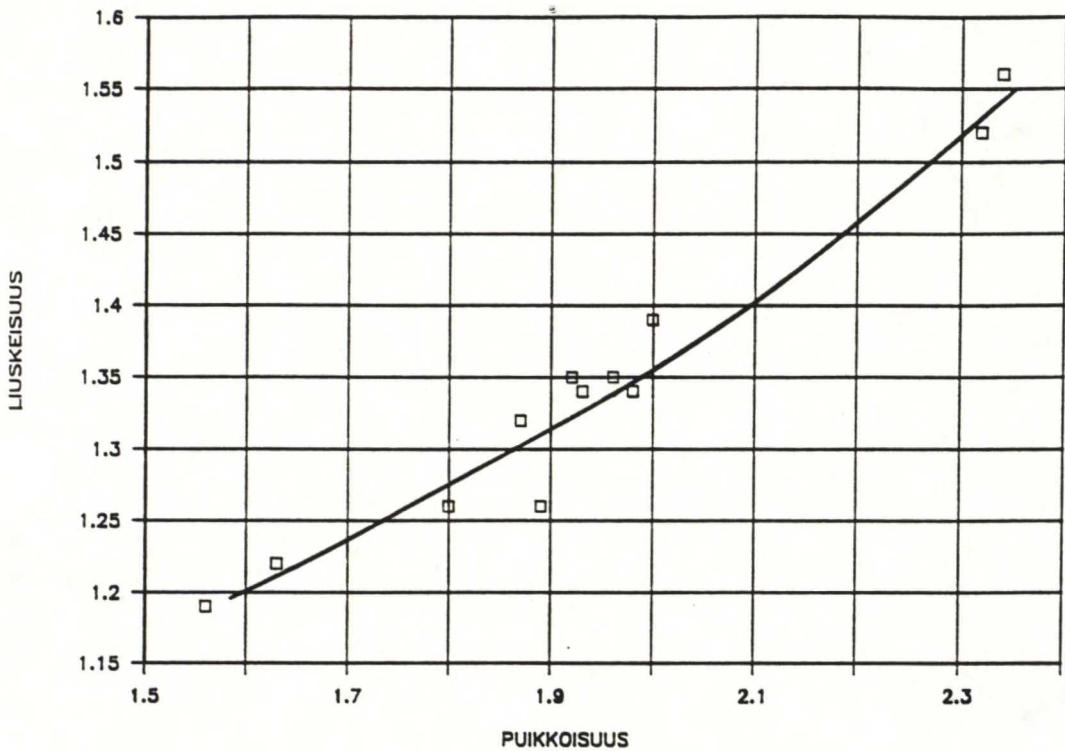
Vertailtavien murskeiden kulmikkuusluvut vaihtelivat välillä $R = 1,34 - 1,56$ ja muotoarvot, 1:liuskeisuus:puikkoisuus, $0,27 - 0,54$. Niiden kiintotiheydet olivat $2650 - 2970 \text{ kg/m}^3$ ja ne koostuivat yli 70 prosenttisesti maasälvästä ja kvartsista. Karkeana runkoaineena käytettiin mursketta ja hienoina kiviaineksina luonnon muovaaman ohessa kivituhkaa siten, että kokonaismurskeprosentti oli 70. Notkeus ja yhdistetty rakeisuus pyrittiin pitämään lujuusvertailujen suorittamiseksi vakiona. Lujuusluokaksi saatiin K35 sementtimäärällä 300 kg/m^3 .

Eri murskeilla mitattiin yhdistetyn runkoaineen tyhjättila IC-laitteella, liite 1. Tyhjättilan ja karkean runkoaineen kulmikkuusluvun R välillä havaittiin jonkinasteinen riippuvuus siten, että kulmikkuusluvun kasvaessa $1,35 \rightarrow 1,55$, tyhjättila kasvoi $21\% \rightarrow 29\%$, kuva 26. Kuitenkin kulmikkuusluvun arvoilla $1,4 - 1,5$ korrelaatiota ei juuri-kaan ollut, vaan tyhjättila vaihteli epäsäännöllisesti välillä $25 - 27\%$.



Kuva 26. Yhdistetyn runkoaineen tyhjättila karkean murskelajitteen kulmikkuusluvun R funktiona.

Raemuotoa tarkasteltaessa havaittiin, että kun rae muuttui puikkoisemmaksi, siitä tuli samalla yhä liuskeisempaa eli niiden riippuvuussuhde toisistaan oli lineaarinen, kuva 27. Sen sijaan liuskeisuuden ja puikkoisuuden arvoista laskettava muotoarvo ei korreloinut kovinkaan selvästi kulmikkuusluvun R kanssa. Murskerakeen muoto heikkeni selvästi alle arvon $0,3$, kun kulmikkuusluku R nousi yli $1,5:n$. Tämä on kuitenkin pitkälti riippuvainen kivilajista ja murskausprosessista. Muotoarvon ja tiiveysasteen välille ei voitu määrittää tarkkaa korrelaatiota.



Kuva 27. Eri murskeiden liuskeisuuden ja puikkoisuuden välinen korrelaatio.

Vaikkakin vasaramurskatun kiven muotoarvo todettiin paremmaksi kuin kartiomurskatun, olivat niiden kulmikkuusluvut yhtä suuria. Runkoaineen tyhjätila ei tällöin juurikaan pienentynyt, eikä lujuusarvoissa ollut eroja.

Murskebetoneilla ei puristuslujuuksissa havaittu merkittävien suuria eroja, kun murskeen kulmikkuusluku R vaihteli välillä 1,34 - 1,56 eli tyhjätila 21 - 29 % sekä muotoarvo välillä 0,27 - 0,54. Myöskään yhdistetyn runkoaineen tyhjätilan ja massan vesisementtisuhteen muutoksilla ei ollut merkittävää vaikutusta lujuuksiin.

Vesisementtisuhteilla 0,61 - 0,68 vaihtelivat puristuslujuudet välillä 36 - 40 MPa epäjohdonmukaisesti. Ainoan poikkeuksen teki kaikkein liuskeisin ja puikkoisin murske, jonka kulmikkuusluku oli 1,51 ja muotoarvo 0,27. Sen hienoaineen ominaispinta-ala oli niin suuri, että

sen vesisementtisuhte nousi 0,81:een ja 28 vuorokauden puristuslujuus laski 27 MPa:iin.

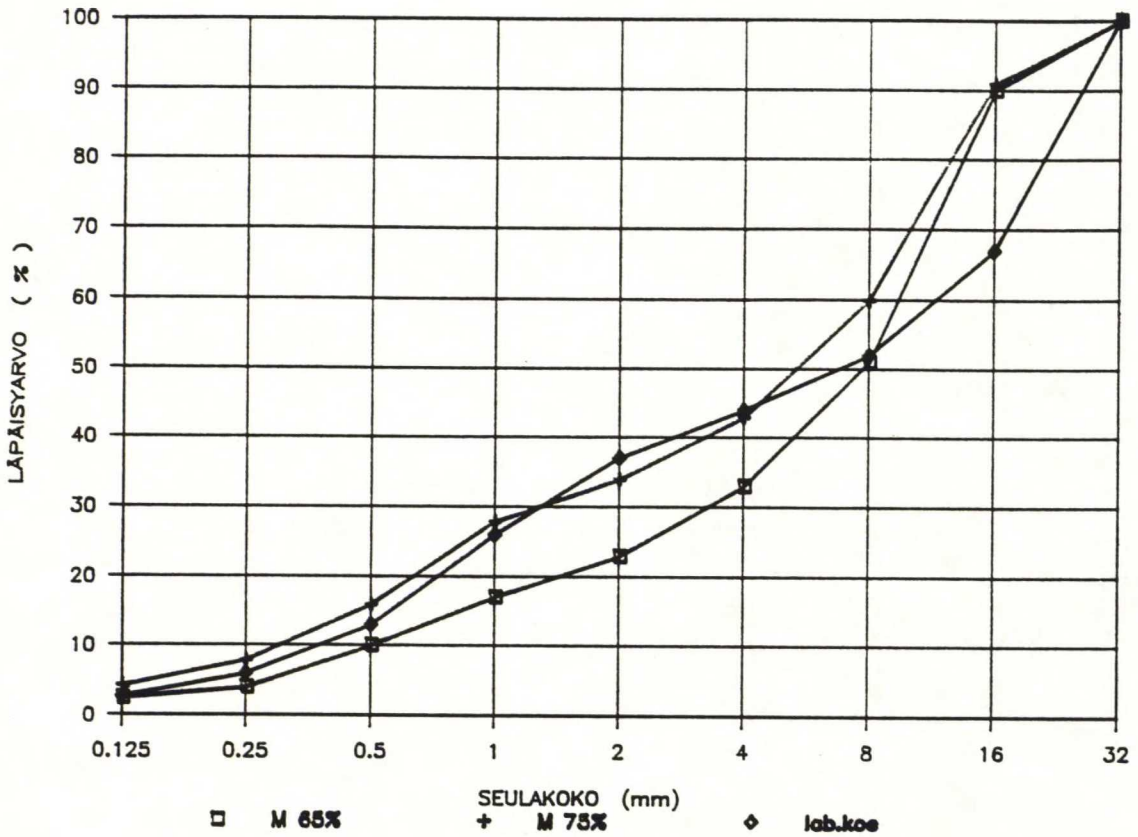
Suurin veden erottuminen saatiin murskemassalle, jonka seulan 0,125 mm läpäissyt filleriaines oli karkearakeista, eikä sen ominaispinta-ala ollut suuri. Lentotuhkan todettiin pienentävän veden erottumista huomattavasti.

11. NESTEYTETTY BETONI

11.1 Suhteitustiedot

Nesteytetyn betonin tavoitepainumaksi asetettiin 20 cm sekä tavoitelujuusluokaksi K40. Laboratoriokokeissa betonien koostumukset olivat täysin samoja kuin yleisbetoneilla K40 tehonotkistinta lukuun ottamatta, jota käytettiin murskeettomassa vertailumassassa 1,5 % sementin määrästä tavoitenotkeuden saavuttamiseksi. Koesarjan murskemassojen runkoaineen rakeisuus oli vakio ja tavoitenotkeus säädettiin tehonotkistimen määrällä eli vesisementtisuhte pidettiin myös vakiona. Tarkat suhteitustiedot laboriokokeista on esitetty liitteessä 7 ja yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakauma kuvassa 28.

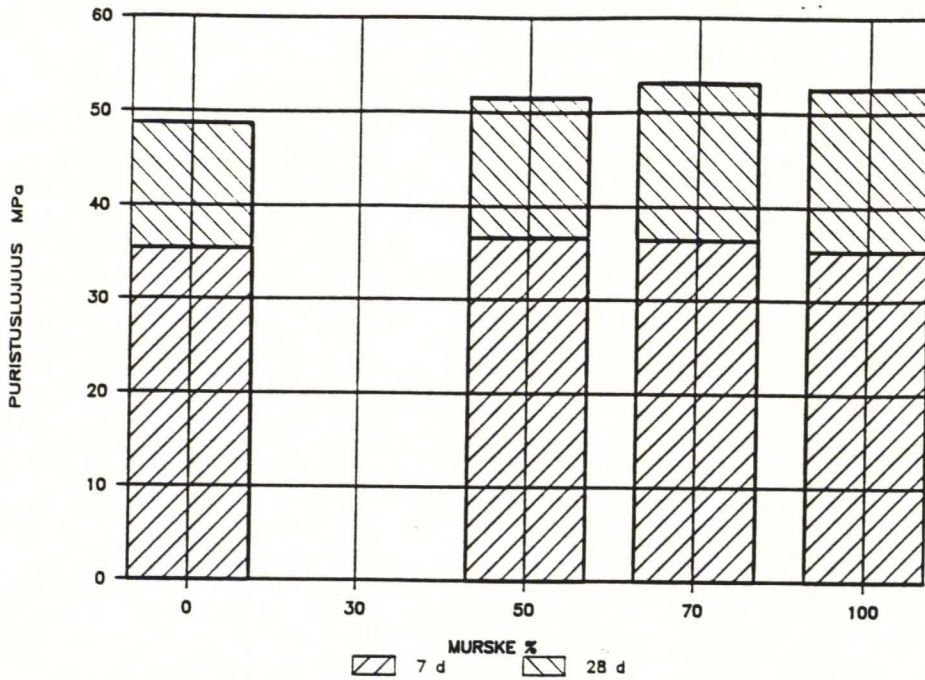
Työmaakokeissa käytettiin sementtiä kuten yleisbetoneissa K40 eli 20 kg/m³ vähemmän kuin laboratoriokokeissa. Nesteytetyn betonin koostumus oli täysin sama kuin valmisbetonitehtaan yleisbetonin K40 lisättynä 2,0 % Melment L10/40 tehonotkistinta. Runkoaineen yhdistetty rakeisuusjakauma vaihteli jonkin verran samasta syystä kuin yleisbetoneillakin (kuva 28). Kiviaines ja kiviaineskombinaatiot olivat samoja kuin yleisbetoneilla K40. Tarkat suhteitustiedot työmaakokeista on esitetty liitteessä 4.



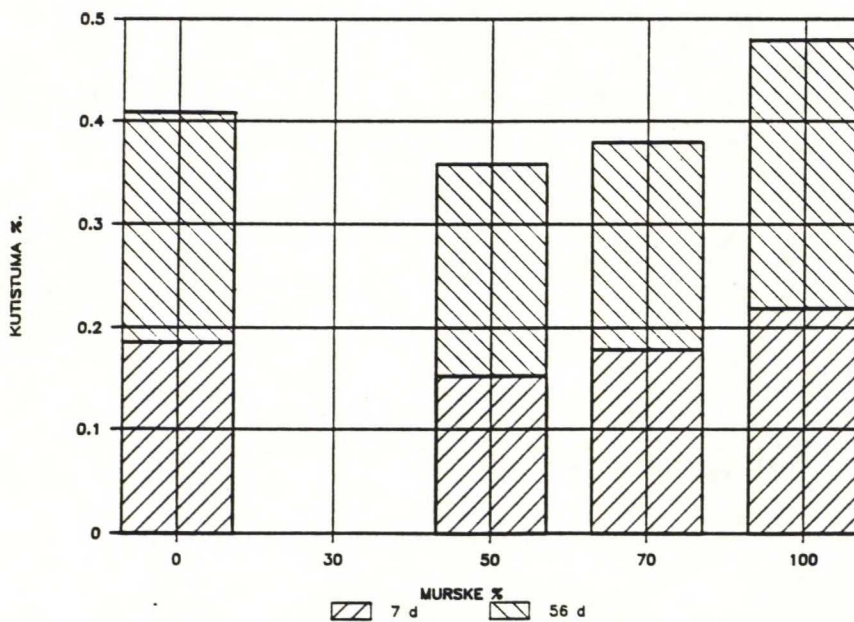
Kuva 28. Yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakaumat nesteytetyllä betonilla K40. Laboratorion rakeisuus-käyrän $H = 450$, työmaakokeissa murskemäärillä 65 % $H = 430$ ja 75 % $H = 490$. Mursketta 50 % sisältävän tuotantomassan $H = 460$.

11.2 Nesteytetyn betonin koetulokset

Laboratoriokokeiden puristuslujuudet ja hydrataatiokutistumat on esitetty kuvissa 29 ja 30.



Kuva 29. Nesteytetyn betonin K40 särmältäään 150 mm:n kuution 7d ja 28 d puristuslujuudet eri kalliomurskemäärillä laboratoriokeissa.



Kuva 30. Nesteytetyn betonin K40 7d ja 56 d hydrataatio-kutistumat eri kalliomurskemäärillä laboratoriokeissa.

Tarkat koetulokset laboratoriokeista on esitetty taulukkomuodossa liitteessä 8 sekä työmaakeista liitteessä 6.

11.3 Nesteytetyn betonin koetulosten tarkastelu

Tavoitenotkeuden saavuttamiseksi riitti murskemassoille laboratorionkokeissa 1,5 prosentin tehonotkistimen annostus lukuunottamatta täysin kalliomurskeesta koostuvaa massaa, joka vaati 3-kertaisen annostuksen. Tämä johtuneesi siitä, että tehonotkistin tehostaa voitelevien hienoaainesten vaikutuksen moninkertaiseksi niin, ettei murskeen jäykistävällä ja sisäistä kitkaa lisäävällä vaikutuksella ole niin paljon merkitystä. Vasta kun hienoin kiviaines kokonaisuudessaan koostui murskeesta, jouduttiin tehonotkistimen määrä moninkertaistamaan. Tämä saattoi osittain johtua murskefillerissä esiintyvistä sähköstaattisista varauksesta, joka saa aikaan fillerikasaumia. Täysin murskeesta koostuvan massan lähtönotkeus, painuma 0 cm oli toisaalta niin jäykkä, että sen nesteyttäminen vaati normaalia suuremman annostuksen.

Koesarjan massojen lämpötilojen sekä painumien pienet erot eivät vaikuttaneet koetuloksiin. Ilmapitoisuudet 0,7 - 1,0 % sekä tiheydet pysyivät lähes vakioina murskemäärästä riippumatta. Kolmen tunnin veden erottuminen vaihteli 1 - 1,8 ml lukuunottamatta 100 prosentin murskemassaa, jossa veden erottumista tuoreen massan pintaan ei tapahtunut.

Kuvasta 29 havaitaan laboratorionkokeissa puristuslujuuksien suurentuvan murskemäärän kasvaessa vesisementtisuhteen pysyessä vakiona. Lujuuden kasvu on suhteessa suurinta, kun kalliomurskeen määrä nousee 0 -> 50 prosenttiin eli vain karkean, yli 8 mm:n runkoaineen koostuessa murskeesta. Tarkasteltaessa pelkästään murskerakeen fysikaalisten ominaisuuksien välitöntä vaikutusta betonin lujuuteen, havaitaan karkealla runkoaineella olevan suurempi vaikutus lujuuteen kuin hienorakeisella runkoaineella. Tämä selittyy osittain sillä, että luonnon muovaamista kiviaineksista hienorakeinen runkoaine on kulmikkaampaa

kuin karkea runkoaine. Sen korvaaminen hienolla kalliomurskeella ei aiheuta niin suurta muutosta kulmikkuudessa ja pinnan karheudessa, että se suurentaisi merkittävästi lujuuksia. Hienorakeisella runkoaineella on kuitenkin kokonaisuudessaan suurempi välillinen vaikutus lujuuteen suuremman veden tarpeen tai suuremman tehonotkistinmäärän kautta.

Taivutusvetolujuudet olivat 28 d iässä luonnon muovaamaa kiviainesta käyttäen 11 % ja täysin mursketta runkoaineena käytettäessä 13 % vastaavien puristuslujuuksien arvoista. Kalliomurskeen lisäys kasvatti siis taivutusvetolujuuksia suhteessa hieman enemmän kuin puristuslujuuksia, kun vesisementtisuhde pysyi vakiona.

Kuivumiskutistumat pienenevät hieman murskemäärän kasvaessa eli kulmikkaiden murskerakeiden kyky vastustaa sementtikiven kutistumista on suurempi kuin luonnon muovaamalla kiviaineksella, kuva 30. Kutistuma on kuitenkin enemmän riippuvainen käytettävästä absoluuttisesta vesimäärästä tai tehonotkistimen annostuksesta, sillä tehonotkistimen 3-kertainen annostus eli 5,3 % sementin määrästä 100 prosentin murskemäärällä suurensi kutistumaa 17 % luonnon kiviainekseen verraten.

Työmaakokeissa tutkittiin mahdollisuutta lisätä tuotantomassan 50 prosentin murskemäärää. Tuotantomassan erittäin hyvälaatuisesta hienoaineksesta johtuen ei massa ollut liian kivistä, vaikka sen karkea runkoaine koostui kalliomurskeesta. Murskelajitetta 3 - 8 mm lisättäessä yhdistetty rakeisuus muuttui 70 % murskemäärällä karkeammaksi ja massa kivisen tuntuiseksi. Sen nestemäinen olemus hävisi, vaikka painuma oli 20 cm. Massan liukuminen betoniauton siirtorännissä vaikeutui ja tiivistyminen ilman tärytystä jäi heikoksi. Runkoaineen karkeammasta rakeisuudesta seurasi pienempi veden tarve, joten tehonotkistinmäärää voitiin vähentää 2,0 -> 1,5 prosenttiin vesisementtisuhteen ollessa vakio. Lujuusarvot kasvoivat tällöin odotetusti noin 10 %.

Työstettävyyden parantamiseksi lisättiin kivituhkaa 0 - 3 mm, jolloin murskemääräksi tuli 75 %. Vaikka runkoaineen rakeisuus muuttui hienommaksi, massa oli edelleen liian kivistä, eikä sillä ollut riittävää koheesiota, kuva 31.

Puristuslujuus oli kuitenkin suurempi kuin tuotantomassalla. Riittävän koheesiokyvyn aikaansaaminen massaan näin suurilla murskemäärillä edellyttäisi erittäin suurta kivituhkamäärää, jolloin veden tai tehonotkistimen tarve kasvaisi. Tämä alentaisi lujuuksia, eikä massan kivisyyden tuntu todennäköisesti häviäisi lainkaan.



Kuva 31. Nesteytetty murskebetoni K40 murskemäärällä 75 % ja painuma-arvolla 15 cm.

Nesteytetyssä betonissa on murskeen aiheuttama suurempi sisäinen kitka kompensoitava notkeammalla sementtiliimalla tavoitepainuman saavuttamiseksi. Tällöin on suurempi mahdollisuus kivitasaumien muodostumiselle, kun koheesion puuttuessa sementtiliima erottuu massasta. Pelkän veden erottuminen on nolla. Mikäli notkeus kasvaa liian suureksi kuten kuvassa 32, on massa tällöin kelvotonta.



Kuva 32. Nesteytetty murskebetoni K40 murskemäärällä 75 % ja painuma-arvolla 25 cm. Huomaa kivitasauman muodostuminen ja sementtiliiman erottuminen massasta.

Mikäli myös hienoa, alle 8 mm:n runkoainetta halutaan korvata murskeella, olisi sekä lujuuden että työstettävyyden kannalta paras ratkaisu käyttää luonnonsoran rinnalla rakeisuudeltaan yli 1 - 2 mm:n murskelajitetta sekä tätä hienompana aineksena luonnonfilleriä 0 - 1 mm. Näin rakeisuusjakauma pysyisi tarpeeksi hienona. Työstettävyyden kannalta murskeen maksimimäärä on riippuvainen suuresti fillerin määrästä ja laadusta.

Valettava rakenne saattaa asettaa erittäin korkeita vaatimuksia massan työstettävyydelle. Tämä poissulkee suurien murskemäärien käytön esimerkiksi erittäin tiheästi raudoitettussa, vaikeasti tärytettävissä rakenteissa. Tällöin massalta edellytetään pientä sisäistä kitkaa, kykyä liikua ja tiivistyä ilman tiivistystyötä. Murskemassoilla on suurempi mahdollisuus kivikasaumien muodostumiseen. Usein kuitenkin normaaleissakin rakenteissa käytetään nesteytettyä tai erittäin vetelää, alle 1 svb:n betonia tiivistystyön vähentämiseksi. Tällaisiin kohteisiin murske soveltuu kuten normaaleihin yleisbetoneihinkin, kunhan notkistaminen tapahtuu lisäaineilla eikä helposti erottuvalla vedellä.

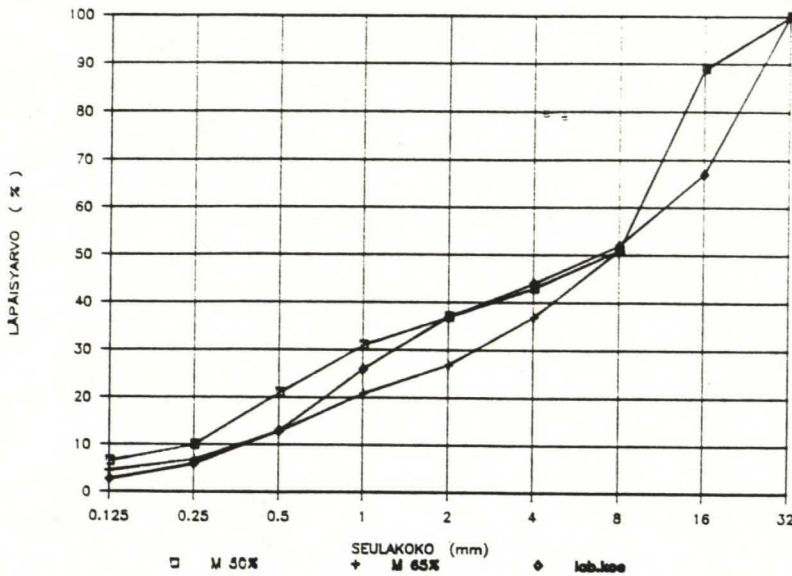
Kalliomurskeen käyttömahdollisuudet nesteytetyssä betonissa riippuvat pitkälti siitä, halutaanko se nimensä mukaisesti säilyttää erittäin juoksevana, nestemäisenä massana. Teknisesti sen käyttö on mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa. Kysymys on tapauskohtaisesti massan laadulle asetettavien raja-arvojen määrittämisestä.

12. HUOKOSTETTU BETONI

12.1 Suhteitustiedot

Laboratoriokokeiden suhteitusten lähtökohdaksi valittiin Karhulan valmisbetonitehtaan huokostetun betonin suhteitus lujuusluokassa K40. Rakeisuusjakauma sekä betonin osaineiden määrät pidettiin vakioina lukuunottamatta huokostinmäärää. Tavoiteilmapitoisuudeksi valittiin sekä laboratorio- että työmaakokeissa 6 %, jonka oletettiin käytännössä kuljetuksen ja pumppauksen aiheuttaman ilmapitoisuuden pienenemisen jälkeenkin täyttävän pakkasenkestävälle betonille asetetut ilmapitoisuusvaatimukset. Huokostinmäärät eivät näin olleet yhtä suuria laboratorio- ja työmaakokeissa. Tavoitenotkeus 2 - 3 sVB säädettiin vesimäärän avulla, joten vesisementtisuhdetta ei pyritty pitämään vakiona. Luonnon muovaamaa runkoainetta korvattiin kalliomurskeella samaan tapaan kuin yleisbetoneillakin karkearakeisimmasta lajitteesta alkaen.

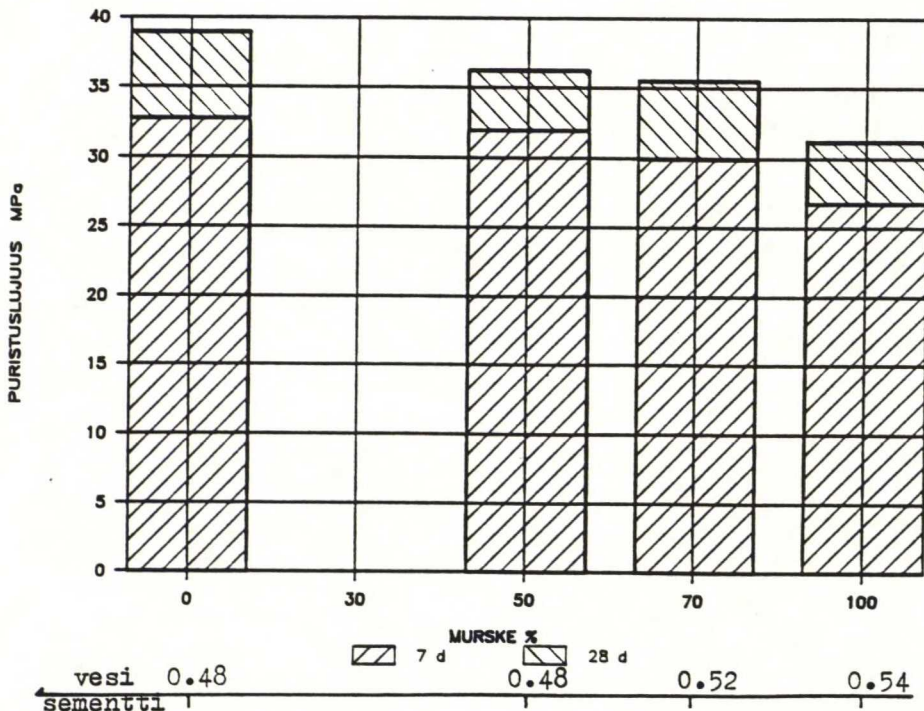
Tarkat suhteitustiedot laboratoriokokeista on liitteessä 7 sekä työmaakokeista liitteessä 4. Kuvassa 33 on esitetty huokostetun betonin yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakaumat. Laboratoriokokeissa rakeisuuskäyrä oli sama kaikille koemassoille, työmaakokeissa se vaihteli jonkin verran käytössä olevista murskelajitteista riippuen.



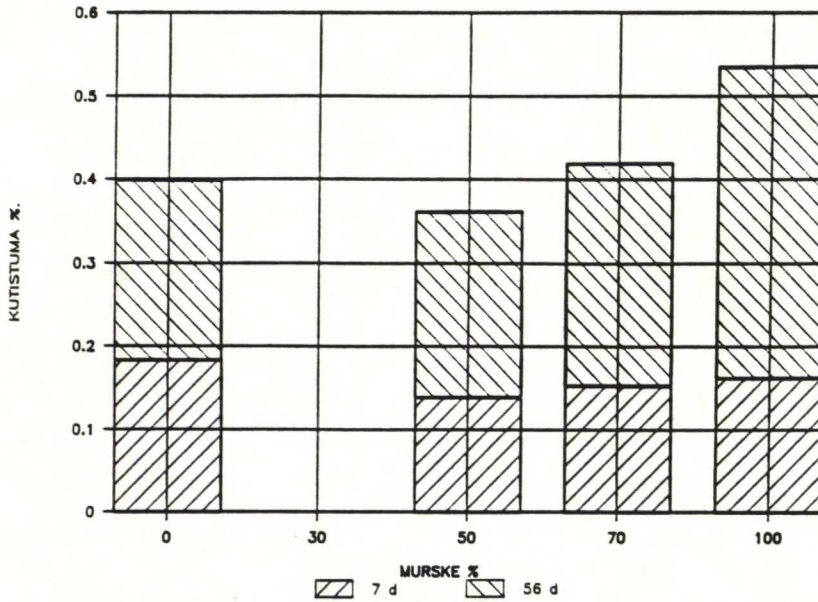
Kuva 33. Huokostetun betonin K40 yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakaumat. Laboratoriokokeissa $H = 450$, työmaakokeissa murskemäärillä 50 % (tuotantomassa) $H = 490$ sekä 65 % $H = 450$.

12.2 Huokostetun betonin koetulokset

Laboratoriokokeiden puristuslujuudet ja kuivumiskutistumat on esitetty kuvissa 34 ja 35.



Kuva 34. Huokostetun betonin K40 särmältään 150 mm:n kuution puristuslujuudet eri kalliomurskeen määrillä laboratoriokokeissa. Kuvan alla vesisementtisuhteet.



**Kuva 35. Huokostetun betonin K40 56 vuorokauden kuivumis-
kutistumat laboratorikokeissa eri kalliomurskeen
määrillä.**

Tarkat koetulokset laboratorikokeista on taulukkomuodossa esitetty liitteessä 8 sekä työmaakokeista liitteessä 6.

12.3 Huokostetun betonin koetulosten tarkastelu

Laboratorikokeiden koemassojen lämpötilat vaihtelivat 21 - 22 °C, painumat 7 - 8 cm, muodonmuutosajat 1,0 - 1,2 sVB sekä ilmapitoisuudet välillä 5,2 - 6,5 %, joten murskemassoja voidaan keskenään pitää vertailukelpoisina.

Kirjallisuusviitteiden mukaan kalliomurskeen käyttö huokostetun betonin runkoaineena pienentää ilmapitoisuutta ja nostaa tarvittavan huokostinannostuksen määrää tavoiteilmamäärän saavuttamiseksi. Laboratorikokeissa saatiin kaikkiin murskemassoihin noin 6 %:n ilmamäärä Parmix L huokostimen annostuksella 0,025 % sementin määrästä,

lukuunottamatta täysin kalliomurskeesta koostuvaa massaa, joka vaati 50 % suuremman annostuksen. Tämä johtuu hienojakoisen murskefillerin eli kivipölyn taipumuksesta täyttää ilmahuokosia ja tiivistää massaa. Luvussa 6 on tarkasteltu kivituhkan vaikutusta betonin ominaisuuksiin.

Kuten kuvasta 34 havaitaan, pienenevät laboratoriokokeissa puristuslujuudet murskemäärän kasvaessa siten, että murskemäärällä 100 % lujuus oli peräti 20 % heikompi kuin luonnon muovaamaa kiviainesta käyttäen. Tämä johtuu pääasiassa vesisementtisuhteen suurenemisesta. Kalliomurskeen fysikaalisilla ominaisuuksilla ei havaittu olevan lujuutta suurentavaa vaikutusta. Suuremman sementtikiven huokosmäärän vuoksi betonin lujuus on, toisin kuin yleisbetoneilla enemmänkin riippuvainen sementtikiven lujuudesta kuin sementtikiven ja runkoaineen välisestä tartunnasta. Pienellä vesisementtisuhteella pienikin vesimäärän kasvu vaikuttaa välittömästi lujuuksiin. Taivutusvetolujuudet olivat 28 d iässä noin 12 % vastaavien puristuslujuuksien arvoista murskemäärästä riippumatta.

Kuivumiskutistumat havaittiin kirjallisuusviitteiden mukaisesti huokostetulla betonilla suuremmiksi kuin huokostamattomalla betonilla suuremmasta ilmamäärästä johtuen, kuva 35. Kutistuma-arvojen todettiin pienenevän 9 % 56 d iässä murskemäärän kasvaessa 0 -> 50 prosenttiin, kun vesimäärä pysyi vakiona. Pienikin vesimäärän lisäys, päinvastoin kuin yleisbetoneilla suurensi kutistumaa välittömästi. 100 prosentin murskemäärällä 35 % suurempi kutistuma-arvo johtuu näin ollen pääosin vesimäärän kasvusta sekä mahdollisesti huokostimen 50 % suuremmasta annostuksesta.

Työmaakokeissa murskemäärän lisäys 50 -> 65 prosenttiin nosti huokostinmäärän 0,015 -> 0,030 prosenttiin sementin määrästä eli kaksinkertaiseksi.

Tämä johtuu murskemäärän kasvaessa lisääntyvän kivipölyn määrästä ja sen taipumuksesta pienentää ilmamääriä. Lisäksi murskemäärällä 65 % kalliomursketta 3 - 8 mm käyttäen ei runkoaineen yhdistetyn rakeisuuskäyrän hienopäätä saatu pysymään tarpeeksi korkealla, kuva 33. Esimerkiksi hienorakeisemmalla murskelajitteella 1 - 8 mm ei tätä ongelmaa esiintyisi, sillä tällöin suuremmillakin murskemäärillä hienointa kiviainesta olisi riittävästi. Riittävän suuri määrä hienoa hiekkaa nimittäin edesauttaa huokostinta muodostamaan ilmaa, toisaalta filleriaines estää ilmaa poistumasta massasta kuljetuksen ja pumppauksen aikana.

Murskemäärällä 50 % lujuusluokan K40 massa saatiin muodostumaan riittävä ilmamäärä melko pienellä huokostinannostuksella, kun yhdistetyn runkoaineen 1 mm:n seulan läpäisyarvo oli 30 % ja alle 0,125 mm:n kiviaineksen osuus noin 7 %. Tämä vaatii useimmiten erillisen fillerilajitteen käyttöä.

Murskemäärän lisäys pienensi myös työmaakokeissa puristuslujuuksia. Suuresta ilmapitoisuudesta johtuen murskemassojenkin työstettävyyttä säilyi hyvänä, eikä pumpattavuuden kannalta haitallista vettä erottunut massojen pintaan lainkaan.

Ilmamäärän pieneneminen kuljetuksen ja pumppauksen aikana oli murskemäärällä 50 % noin 3 %, josta 2 % poistui 20 km:n kuljetuksen ja 1 % pumppauksen aikana. Murskemäärällä 65 % ilmamäärä pieneni jopa 4 - 5 %. Hienoainesmäärän lisäys pienensi ilmahävikkejä jonkin verran.

Erityisen huomioitavaa on suuri kuljetuksen aikainen ilmahävikki murskemassoilla. Ensimmäisinä poistuvilla suurilla ilmahuokosilla ei betonin pakkasenkestävyyteen ole kuitenkaan niin suurta merkitystä kuin pienemmillä suojahuokosilla. Jotta massan ilmapitoisuus täyttäisi vaatimuksensa muotissa tiivistettynä, on massan ilmapitoisuuden noustava usein hyvin korkeaksi valmisbetoniasemalla. Tämä muodostuu epätaloudelliseksi, jos laadunvalvonnan koekappaleet tehdään välittömästi sekoituksen jälkeen betoniasemalla. Tällöin lujuustaso jää ilmahävikin vaikutuksen verran alhaisemmaksi, kuin jos ilmahävikki olisi hyvin pieni tai laadunvalvonnan koekappaleet tehtäisiin kuljetuksen ja pumppauksen jälkeen.

Kalliomurskeen käyttö huokostetun betonin runkoaineena tekee betonista epätaloudellista, sillä lujuustason säilyttäminen vaatisi useiden kymmenien kilojen lisäystä sementtimääriin tai vesimäärän vähennystä tehonotkistimen avulla. Epätaloudellisuutta lisäsi suurempi huokostinannostus. Mikäli murskelajitteet sisältävät paljon hienoa kivipölyä, voidaan huokostinmäärää kuitenkin todennäköisesti pienentää pesemällä kivipöly kiviaineksista pois. Huokostinmäärää voidaan edelleen pienentää riittävän suurella hienon hiekan määrällä eli optimoimalla rakeisuusjakauma. Optimointi lisää betonin taloudellisuutta myös pienentämällä massan siirtojen aikaista ilmahävikkiä.

Ilmamäärän muodostumiseen ja stabiliuteen on myös huokostimen laadulla sekä mahdollisesti sekoitusajalla ja sekoitusjärjestyksellä oma merkityksensä.

Kuten yleisbetonin K40 kokeissa todettiin, epäjatkuva-rakeisen runkoaineen käyttö murskemassoissa ei pienennä ilmapitoisuuksia. Tällaisen rakeisuusjakauman käyttö huokostettujen murskebetonien ilmaongelmien ratkaisemiseksi on varteenotettava vaihtoehto.

13. MURSKEMASSOJEN PUMPATTAVUUS

Kalliomurskeen käytön voidaan karkeasti sanoen heikentävän massan pumpattavuutta. Murskemassojen pumpattavuus on kuitenkin riippuvainen monista eri tekijöistä, joista murskeen laatu ja määrä muodostavat vain yhden. Kun mursketta lisätään, joudutaan kiviainesrakeiden välistä suurentunutta tyhjätilaa täyttämään vedellä ja usein myös hienoaineksella vaaditun notkeuden ja hyvän työstettävyyden säilyttämiseksi. Näin samalla lisätään myös pumpattavuutta parantavia aineksia. Hienoaainesta lisäämällä saadaan murskemassastakin aina pumpattavan tuntuista. Käytännössä massan ulkonäkö ja sen kivisyys saattavat harhauttaa. Vaikka hienoaainesta olisikin pumpattavuuden kannalta riittävästi, massan pinnassa näkyvät terävasärmäiset murskerakeet saavat helposti luulemaan sitä liian kiviseksi.

Karhulan kaikki betonipumpulla siirretyt murskemassat osoittautuivat hyvin pumpattaviksi ja pumppauspaineet olivat saman suuruisia kuin normaalia tuotantomassaa pumpattaessa. Tähän vaikuttivat osaltaan hyvänlaatuinen filleriaines, lentotuhkan maksimimäärän käyttäminen sekä suhteellisen lyhyet pumppausmatkat. Betonipumppuna käytettiin Schwingin hydraulista mäntäpumppua, jonka putken halkaisija oli 100 mm.

Lujuusluokan K40 massat olivat helposti pumpattavia aina 75 prosentin kalliomurskemäärään saakka. Kriittisimmät massat, lujuusluoka K20 sekä huokostettu betoni ilmamäärällä 5 % pumpattiin vaikeuksitta, kun murskemäärä oli 65 % tai pienempi. Näiden molempien hienoainesmäärä, noin 450 kg/m³ osoittautui riittävän suureksi, taulukko 12. Nesteytetty betoni 50 prosentin murskemäärällä pumpattiin vaikeuksitta. Suurempien murskemäärien käytöstä ei pumpattavuuden kannalta saatu kokemuksia, joskin lujuusluokan K40 betonimassa olisi todennäköisesti ollut pumpattavaa

suuren sementti- ja lentotuhkamääränsä, 440 kg/m³ ansiosta jopa 100 prosentin murskemäärällä. Lujuusluokan K20 75 prosenttia mursketta sisältävä massa vaikutti ilman hienoaineksen lisääystä melkoisen karkearakeiselta pumpattavaksi.

Taulukko 12. Karhulan työmaakokeissa vaikeuksitta pumpattujen murskemassojen hienoainemäärät (runkoaine < 0,25 mm + sementti + lentotuhka).

Betonimassa	K20		K40		K40 huok.		K40 nest.
murskemäärä	42 %	65 %	50 %	65 %	50 %	65 %	50 %
hienoainemäärä	510	450	520	510	500	450	540 kg/m ³

Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestö on antanut pumpattavan betonin hienoainemäärille suositukset: K20 530 - 550 kg/m³ ja K40 470 - 490 kg/m³. Karhulan pumppauskokeissa lujuusluokassa K40 hienoainemäärät olivat suositusten mukaiset. Lujuusluokan K20 murskemassat olivat pumpattavia, vaikka niiden hienoainemäärät olivat lähes 100 kg/m³ pienemmät.

Pumpattavuus ei siis vastoin ennakkokäsityksiä muodostunut kivisyydeltään ongelmalliseksi. Mikäli murskemassa jää liian jäykäksi, on mahdollisuus putkiston kivitukosten muodostumiseen olemassa. Kokenut pumppaaja pystyy normaalikuntoisella betonipumpulla kuitenkin purkamaan pienen alkavan tukoksen sekä estämään täydellisen tukkeuman ja putkistojen purkamisen. Kalliomurskeen pumppua ja putkistoa kuluttavasta vaikutuksesta ei saatu kokemuksia.



Kuva 36. Murskemassan pumppauskoe.

Lujuusluokka K20, murskemäärä 65 %.

14. TALOUDELLISUUSVERTAILU

Murskelajite 3 - 8 mm on muihin kiviaineslajitteisiin verraten huomattavasti kalliimpaa sen suuremmasta jalostusasteesta ja vähäisemmästä käytöstä johtuen. Sen hinta normaalitilanteessa on noin kaksinkertainen luonnonsoraan nähden, jos kuljetuskustannuksia ei oteta huomioon. Hinta vaihtelee kuitenkin suuresti alueellisesti riippuen murskaamojen raaka-aineen, louheen saatavuuden taloudellisuudesta. Kokonaiskustannuksiin kuljetusmatkat vaikuttavat ratkaisevasti.

Kivituhka 0 - 3 mm on seulonnoista jäävä ylijäämätuote, joten sen hinta ainakin nykyisin on alhainen. Sen käyttömahdollisuudet betonin runkoaineena sellaisenaan ovat kuitenkin vähäiset.

Murske kivien 8 - 16 mm seulonnasta jää hienojakoista alle 8 mm:n mursketta, joka alle 1 mm:n aines poispestynä saatTAISI olla paras lajite suuria murskemääriä käytettäessä. Pesu nostaisi tämän muuten edullisen lajitteen hintaa. Korvaamalla murskelajitteen 3 - 8 mm valmistuksessa kivituhkan seulonta vastaavanlaisella pesulla, voitaisiin alempi nimellisraja laskea noin 1 mm:iin ja näin aikaansaada käyttökelpoisempi murskelajite.

Kenttäkokeissa Karhulassa murskelajitteen 3 - 8 mm hinta oli noin 60 % korkeampi kuin muiden kiviainesten keskimääräinen hinta betoniasemalla. Kuljetusmatka murskaamolta betoniasemalle oli 6 km ja soranottopaikalta murskaamolle 40 km, missä luonnonsoraan lisättiin karkeampaa murskattua ainesta. Laskutettava kuljetusmatka mitattiin murskaamolta alkaen.

Yleisbetonin raaka-aineiden kustannukset betoniasemalla nousivat lujuusluokassa K20 7 % eli 10 mk/m³ sekä K40 2,6 % eli 5 mk/m³, kun kokonaismurskemäärä nostettiin 50 -> 65 prosenttiin eli korvattiin osa luonnonsorasta murskeella 3 - 8 mm. Tällä murskemäärällä saavutettiin parhaat puristuslujuudet, taulukko 13.

Taulukko 13. Karhulan yleisbetonin raaka-ainekustannukset betoniasemalla sekä särmältään 150 mm:n kuutioiden 28 d puristuslujuudet eri murskemäärillä.

	murske- prosentti	mk/bet.m ³	pur.lujuus MPa	
K20	42	143	18	tuotantomassa
	65	153	25	
	75	152	20	kivinen massa
K40	50	189	42	tuotantomassa
	65	194	46	
	65	190	42	sementtiä noin 15 kg/m ³ vähemmän
	75	194	44	

Tuotantomassan raaka-ainekustannuksista runkoaineen osuus oli 66 mk/betoni m³ ja muiden osa-aineiden betonilla K20 77 mk/bet.m³ ja K40 123 mk/bet.m³. Murskemäärällä 65 % käytetyn 3 - 8 mm:n murskeen hinta betoniasemalla oli 58 mk/t eli hieman yli 20 mk/t suurempi kuin muiden kiviaineslajitteiden hinta keskimäärin. Murskemäärällä 75 % murskelajitteen 3 - 8 mm lisänä käytetyn kivituhkan hinnaksi on arvioitu sama kuin luonnonsoralle.

Jotta lujuusluokassa K20 murskeen 3 - 8 mm aiheuttama 10 mk:n lisäkustannus kuutiota kohden voitaisiin kompensoida, olisi sementtimäärää vähennettävä noin 25 kg/m³. Tämä vähennys poistaisi 65 prosentin murskemäärällä saavutetun 7 MPa:n lujuudenlisäyksen todennäköisesti kokonaisuudessaan. Näin ollen ei varsinaista kustannussäästöä saavutettaisi nykyisillä kiviaineksen hinnoilla.

Vastaava tilanne saatiin lujuusluokassa K40 murskemäärällä 65 % vähentämällä sementtiä 10 - 20 kg/m³, jolloin sekä kustannukset että lujuus jäivät tuotantomassan tasolle. 75 prosentin murskemäärällä ei sementin vähentämiseen ole juurikaan mahdollisuuksia. Sen kustannukset muodostuvat yhtä suuriksi tuotantomassan kanssa vasta, kun luonnonsoran hinta betoniasemalla nousee noin 12 mk/tonni olettaen murskeiden hintojen pysyvän entisellään. Tämä vastaa 20 km:n kuljetuskustannusta TVL:n taksojen mukaisesti.

Murskeen 3 - 8 mm rinnalla on mahdollista käyttää hyvin hienorakeista luonnonsoraa. Tällöin kiviainestoimittajan ei tarvitsisi summittaisesti lisätä soraan karkeampaa ainesta, jos betonitehtaalla olisi 3 - 8 mm:n murske käytössä. Tämä vähentäisi luonnonsoran jalostusastetta ja saattaisi laskea sen hintaa. Luonnonsoran rakeisuusvaihtelujen merkitys pienenis, kun yhden sijasta lajitteita olisi kaksi ja niiden keskinäisiä suhteita muuttamalla saataisiin yhdistetty rakeisuuskäyrä halutun muotoiseksi ja sen vaihtelualue pienemmäksi.

15. YHTEENVETO

Tutkimuksessa selvitettiin kalliosta murskatun kiviaineksen vaikutus yleisbetonin K20 ja K40, nesteytetyn - sekä huokostetun lisäainebetonin K40 ominaisuuksiin. Erityisesti haluttiin selvittää lujuuden kannalta kalliomurskeen optimimäärä. Kokeet tehtiin vertaamalla murskemääriltään erilaisten betonien ominaisuuksia vertailubetonin ominaisuuksiin. Vertailubetonin runkoaine koostui laboratorio-kokeissa luonnon muovaamasta kiviaineksesta sekä työmaakokeissa 50-prosenttisesti kalliomurskeesta ja 50-prosenttisesti luonnon kiviaineksista. Koemassojen seossuhteet ja notkeusarvo pyrittiin pitämään vakiona vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi.

Etsittäessä raekoon alarajaa, josta lähtien karkeampi kiviaines voidaan korvata kalliomurskeella, on ensinnäkin oltava selvillä käytettävän murskeen ominaisuuksista. Merkittävimmät betonin laatuun vaikuttavista ominaisuuksista ovat murskerakeen muoto ja pinnan karheus. Erityisen suuri merkitys betonin veden tarpeesen ja lujuuteen on hienorakeisen runkoaineen kulmikkuudella ja pintastruktuurin karheudella. Murskerakeiden olisi muodoltaan oltava mahdollisimman kuutiomaisia eli mahdollisimman vähän liuskeisia ja puikkoisia. Karkean kiviaineksen olisi parasta olla pinnaltaan rosoista, jotta rakeen ja sementtikiven välinen tartunta olisi hyvä.

Kulmikkausluvun määrittämisellä saadaan jonkinlainen kuva murskeen muodosta ja pintastruktuurista. Asiantuntija pystyy arvioimaan mursketta silmämääräisesti sen mittasuhteita vertailemalla. Mikäli kalliomurskelajitteen 8 - 16 mm ja 16 - 32 mm kulmikkausluku on pienempi kuin Karhulan murskeen 1,5 sekä lajitteen 3 - 8 mm pienempi kuin 1,2, voidaan tässä tutkimuksessa esitettyjä murskeprosentteja pitää lähtökohtina. Kulmikkauslukuja voidaan vertailla keskenään vain, jos lajitteiden nimellisrajat ovat samat. Esimerkiksi 3 - 8 mm:n lajitteen tyhjätila on suurempi kuin lajitteen 0 - 8 mm, vaikka raemuoto olisikin samanlainen. VTT:n koetusohjeiden mukaisesti tyhjätilan avulla laskettava kulmikkausluku on tällöin myös suurempi, jolloin on olemassa vaara erehtyä luulemaan lajitteen 3 - 8 mm rakeita huonomman muotoisiksi. Kulmikkausluvun mittaustuksessa ylempi nimellisraja saisi olla korkeintaan kaksi kertaa suurempi kuin alempi, kuten lajitteella 8 - 16 mm.

Normaaleissa yleisbetoneissa K20 - K40 on teknisesti mahdollista käyttää pelkästään mursketta runkoaineena. Tämä edellyttää kuitenkin muutoksia betonin suhteituksessa. Korkeammilla lujuusluokilla K40 pieni rakeisuusjakauman hienontaminen eli kunkin seulakoon läpäisyarvon nostaminen muutamilla prosenttiyksiköillä saattaa olla tarpeen massan kivisyyden poistamiseksi, varsinkin jos massan hienoainemäärä eli sementti-, lentotuhka- ja fillerimäärä on pieni ja laadultaan huonoa. Alhaisemmilla lujuusluokilla K20 ainoastaan mursketta runkoaineena käytettäessä kivisyyden välttäminen on huomattavasti vaikeampaa, joten rakeisuutta on hienonnettava moninkerroin enemmän. Lentotuhkan käyttö parantaa tällöin kivisen massan työstettävyyttä. Veden erottuminen ei 100 prosentin murskemäärillä murskefillerin käytöstä johtuen muodostu ongelmalliseksi. Sen sijaan murskemäärillä 50 - 80 % se saattaa luonnonfillerin käytöstä johtuen kasvaa.

Tämä ei kuitenkaan muodostu ongelmalliseksi, mikäli hieno-aineksena on mahdollisuus käyttää lentotuhkaa ja hyvälaatuista filleriä. Mikäli kivituhkan murskefilleriosuus on suuri, sitä voidaan käyttää pienentämään veden erottumista.

Yhtä paljon kuin murskeen kitkaisuutta kasvattavaan vaikutukseen, on huomiota kiinnitettävä myös hienoainesosan kitkaisuutta pienentäviin tekijöihin. Karhulassa käytössä ollut filleri sekä soran filleriosuus olivat laadultaan erinomaisia; erittäin hienojakoisia, suhteessa pieni ominaispinta-ala sekä määrältään riittäviä, jotta suhteellisen korkeisiin murskeprosentteihin päästiin. Lisäksi maksimimäärä lentotuhkaa oli osaltaan pienentämässä sisäistä kitkaa ja parantamassa betonimassan koheesiota.

Laboratoriokokeissa saavutettiin parhaat lujuudet lujuusluokassa K20 50 prosentin ja K40 70 prosentin murskemäärällä. Lujuuden lisäys oli tällöin vajaa 10 % (K20) ja noin 20 % (K40) verrattuna betoniin, jonka runkoaine oli täysin luonnon muovaamaa kiviainesta. Vaaditun lujuustason saavuttamiseksi oli murskemassoissa mahdollista käyttää 13 % suurempia vesisementtisuhteen arvoja. Kovettumiskutistumat eivät olleet riippuvaisia absoluuttisesta vesimäärästä, vaan pysyivät lähes vakioina murskemääristä riippumatta. Taivutusvetolujuudet kasvoivat samassa suhteessa puristuslujuuksiin.

Lujuudeltaan parhaissa murskemassoissa käytettiin työmaakokeissa ainoastaan rakeisuudeltaan yli 3 mm:n murskeita. Tällöin kokonaismurskemäärä oli 65 % kuitenkin niin, että korkeammilla lujuusluokilla oli riittävän hyvä työstettävyyys huomioonottaen mahdollisuus käyttää suurempia murskemääriä kuin alhaisilla lujuuksilla. Luonnon muovaamaan runkoaineeseen verraten lujuuden lisäys 60 - 70 prosentin murskemäärillä mahdollistaisi noin 10 - 30 kg/m³ sementin säästön. Tämä ei kuitenkaan alenna raaka-ainekustannuksia

nykyisillä kiviainesten hinnoilla. Todennäköisesti betonin lujuuden kannalta parhaat murskelajitteet olisivat rakeisuudeltaan 1 - 2 mm:stä ylöspäin, jolloin kokonaismurskemääräkin muodostuisi suuremmaksi eli noin 80 prosentiksi.

Mikäli kulmikkuusluvut ovat tutkimuksen murskeiden kulmikkuuslukuja suurempia tai luonnonkiviaines, varsinkaan filleriosaltaan ei ole kovin hyvälaatuista, joudutaan hienoainesta lisäämään, kunnes murskemassa saavuttaa hyväksyttävän työstettävyydestason. Tämä lisää usein veden tarvetta niin paljon, että murskemäärän vähentäminen mainituista arvoista on taloudellisempaa.

Erimuotoisia, eri kallioalueilta peräisin olevia murskeita tutkittaessa havaittiin niiden liuskeisuuden ja puikkaisuuden välillä korrelaatio. Yhdistetyn runkoaineen tyhjätilan ja murskelajitteen kulmikkuusluvun R välille saatiin myöskin määritettyä riippuvuussuhde. Murskebetonien puristuslujuudet vaihtelivat epäsäännöllisesti välillä 36 - 40 MPa, kun kulmikkuusluvun R arvot olivat karkealla murskeella 1,34 - 1,56 ja vesisementtisuhde 0,61 - 0,68. Betonin puristuslujuuden riippuvuus murskeen raemuodosta havaittiin siis epämääräiseksi raemuodoltaan tavanomaisilla murskeilla. Erittäin liuskeista ja puikkoista mursketta käyttäen jäivät puristuslujuudet kuitenkin alhaisemmiksi.

Rakeisuudeltaan epäjatkuvan runkoaineen käyttö on murskebetoneissa K40 mahdollista. Tällöin karkean, yli 8 mm:n murskatun kiviaineksen osuuden on oltava hieman suurempi kuin vastaavalla jatkuvarakeisella runkoaineella. Optimimäärä 50 - 60 % kasvaa, kun hieno runkoaine muuttuu rakeisuudeltaan hienommaksi tai laadultaan paremmaksi. Hienoimman runkoaineen on suuren veden tarpeen vuoksi edullisinta olla luonnon muovaamaa, joskin sen joukossa voidaan käyttää pieniä määriä kivituhkaa. Epäjatkuvuusaukko 2 - 8 mm havaittiin sopivaksi. Sen suurentaminen heikentää massan

koossapysyvyyttä ja vaikeuttaa pumpattavuutta. Epäjatkuvarakeisen runkoaineen käyttö saattaa suurentaa veden erottumista, joten laadultaan hyvän ja määrältään riittävän hienoaineen käyttö on välttämätöntä.

Murskatuissa kiviaineksissa on aina mukana murskefilleriä eli kivipölyä, jolla on useimmiten betonin ominaisuuksia parantava vaikutus. Se pienentää kuitenkin hienorakeisuudesta johtuen betonimassan ilmapitoisuutta. Tällä ei kuitenkaan ole vaikutusta huokostetun betonin pakkaskestävyyteen, sillä murskebetoniinkin saadaan muodostumaan riittävä ilmapitoisuus, tosin suuremmalla huokostinannostuksella. Laboratoriokokeissa pelkkää kalliomursketta käyttäen huokostinannostus oli 50 % suurempi kuin pienemmillä murskemäärillä. Työmaakokeissa murskemäärän nostaminen 50 -> 65 prosenttiin kaksinkertaisti huokostinmäärän tavoiteilmamäärän 6 % saavuttamiseksi. Työstettävyyden ei huokostetuilla murskebetoneilla ratkaisevasti heikentynyt murskemäärän lisääntyessä, kun ilmamäärä pidettiin huokostimen avulla vakiona. Kuljetuksen ja pumppauksen aikana saattaa ilmamäärä pienentyä jopa alle puoleen alkuperäisestä arvostaan, mikäli hienoa, alle 1 mm:n hiekkaa ja filleriä ei massassa ole riittävästi. Normaalien yleisbetonien lujuuden lisäystä ei huokostetuilla murskebetoneilla saavutettu, vaan murskemäärän kasvaessa lujuus pieneni.

Painumaltaan yli 20 cm:n betoneissa murskeen käyttö pienentää massan kykyä liikkua ja tiivistyä ilman tiivistystyötä. Tämä poissulkee suurien murskemäärien käytön esimerkiksi erittäin tiheästi raudoitetuissa, vaikeasti täytettävissä rakenteissa, jolloin on olemassa suurempi mahdollisuus kivikasaumien muodostumiseen. Karkeana runkoaineena voidaan kuitenkin käyttää mursketta, mikäli luonnon muovaamaa hienoainesta on riittävästi hyvän työstedävyyden saavuttamiseksi. Betonin puristuslujuudet kasvoivat murskemäärän kasvaessa, eikä tehonotkistimen annostuksia

tarvinnut lisätä lukuunottamatta täysin murskeesta koostuvaa massaa, joka vaati moninkertaisen annostuksen. Normaleissa rakenteissa voidaan vetelissä, painumaltaan 10 - 20 cm:n massoissa käyttää mursketta kuten yleisbetoneissa-kin. Kalliomurskeen käyttömahdollisuudet ovat teknisesti hyvät ja kysymys on massan laadulle tapauskohtaisesti asetettavien raja-arvojen määrittämisestä.

Murskemassojen pumppaus työmaakokeissa ei vastoin ennakkokäsityksiä muodostunut ongelmalliseksi, sillä massojen hienoainesmäärät osoittautuivat riittäviksi. Alhaisemmilla lujuusluokilla saattaa yli 65 prosentin murskemäärillä ilman hienoaineuksen lisäystä esiintyä ongelmia veden erottumisesta ja liiallisesta kivisyydestä johtuen.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Betonin kiviainesten luokitusohjeet. Helsinki 1982. Suomen Betoniyhdistys r.y. Julkaisu BY 20. 23 s.
- /2/ Betonitekniikka. Helsinki 1979. Suomen Rakennusinsinööriliitto. Julkaisu RIL 119. 471 s.
- /3/ Betonitekneillisiä koetusohjeita, III osa. Otaniemi 1970. Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Betonitekneillinen laboratorio, Tiedonanto 3. 162 s.
- /4/ Bloem, D. L. & Gaynor, R. D., Effects of aggregate properties on strength of concrete, Proceedings, American Concrete Institute, 60 (1963) 10, s. 1429-1454.
- /5/ Colbjørnsen, A., Knust sand som tilslag i betong, Nordisk betong 1972:2. s. 119-132.
- /6/ Gronhaug, A., Evaluation and influence of aggregate particle shape and form. Betongtekniske publikasjoner 1967:7. s. 17-33.
- /7/ Guide for use of normal weight aggregates in concrete. Committee report. ACI journal 1984.
- /8/ Hartikainen, O-P., Kalliorakennustekniikka. Espoo 1980, Otakustantamo. 205 s.
- /9/ Hylkilä, E., Menetelmät kiviaineksen raemuodon tutkimiseksi ja raemuodon vaikutus betonin vedentarpeeseen ja puristuslujuuteen. Diplomityö. Oulun yliopisto, rakennusinsinööri-osasto. Oulu 1968. 50 s.
- /10/ Höbeda, P. & Johansson, L., Kvalitetskriterier för grus- och makadammaterial - en litteraturinventering. Stockholm 1975. Cement- och betonginstitutet, forskning 5. 156 s.
- /11/ Jatkola, J., Jalostetun kiviaineksen käyttö betonissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööri-osasto. Otaniemi 1985. 74 s.
- /12/ Johansson, L. & Glevbo, G., Concrete with crushed aggregate. Stockholm 1981. Cement- och betonginstitutet, forskning 1. 137 s.
- /13/ Jäniskangas, T., Hienojen ainesosien vaikutus betonin ominaisuuksiin. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennustekniikan osasto. Tampere 1987. 90 s.

- /14/ Kaplan, M. F., The effects of the properties of coarse aggregate on the workability of concrete. Magazine of concrete research, 10 (1958) 10. 63-74.
- /15/ Kauranne, L. K., Gardemeister, R., Korpela, K. & Mälkki, E., Rakennusgeologia II. Espoo 1972. Otakustantamo. 530 s.
- /16/ Kauranne, L. K., Kiven laadun vaikutus murskauksessa. Maansiirto 1971:4. s. 36-39.
- /17/ Koskinen, M. & Nykänen, J., Betonin pumppauksen teknis-taloudelliset edellytykset. Espoo 1973. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tiedonanto 26. 97 s.
- /18/ Lehmusojä, J., Luonnonfillerin korvaaminen keino-tekoisella valmisteella. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto. Otaniemi 1970. 72 s.
- /19/ Maa- ja kalliorakennus. Helsinki 1976. Suomen Rakennusinsinööriliitto, Julkaisu RIL 98. 467 s.
- /20/ Malmberg, B., Betong med krossgrus som ballast - en litteraturinventering. Stockholm 1979. Cement- och betonginstitutet, forskning 7. 86 s.
- /21/ Mantila, A., Betonin valmistuksen vaatimukset kivi-aineksille. Murskauspäivät 1987. 18 s.
- /22/ Murdock, L. J., The workability of concrete. Magazine of concrete research, 12 (1960) 36. s. 135-144.
- /23/ Neville, A. M., Properties of concrete. London. Pitman 1981. 712 s.
- /24/ Opetusmonisteet, Rakennusaineopin yleisopintojakso. Otakustantamo 1982.
- /25/ Orchard, D. F., Concrete technology, 3rd edition, vol. 1, Properties of materials. London 1973. 375 s.
- /26/ Poijärvi, H., Kiviaineksen hienojakoisimman osan vaikutuksista betonin ominaisuuksiin. Helsinki 1966. Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Julkaisu 110. 197 s.
- /27/ Poijärvi, H., Murskatun kiviaineksen käyttö betonin runkoainena. Esitelmä Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestön valmisbetonijaoston kokouksessa. Jyväskylä 1974.

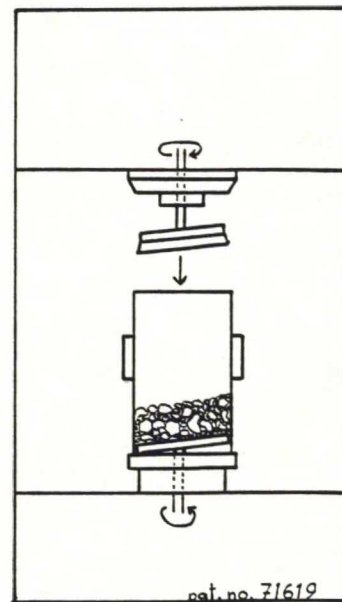
- /28/ Poijärvi, H., Murskatut kiviainekset ja betonin pakkasenkestävyys. Sementtiyhdistyksen tiedotuksia 1974:4.
- /29/ Powers, T. C., Topics in concrete technology. Skokie, Illinois 1965. (Portland Cement Association. Research and Development Laboratories. Research Department. Bulletin 174.)
- /30/ Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M., Geotekniikka. Espoo 1984. Otakustantamo. s. 193.
- /31/ Rothfuchs, G., Über die Festigkeitsunterschiede zwischen Kiesbeton und Splittbeton. Betonstein-Zeitung 25 (1959) 9. s. 371-376.
- /32/ Salmelainen, J., Kalliomassojen hyötykäyttö. Rakennustekniikka 1986:1. s. 31-33.
- /33/ Schäper, M., Splittbeton mit Brechsand - eine Machbarkeitsstudie. Betonwerk + Fertigteil-Technik 11 (1987). s. 757-763.
- /34/ Schergold, F. A., The percentage of voids in compacted gravel as a measure of its angularity. Magazine of concrete research 5 (1953) 13. s. 3-10.
- /35/ Sällström, S., Ballast. Cement- och betonginstitutet, kursverksamheten A. Stockholm 1973. 32 s.
- /36/ Tunneli- ja kalliorakennus I. Helsinki 1987. Suomen Rakennusinsinööriliitto, Julkaisu RIL 154-1. 363 s.
- /37/ Wills, M. H., How aggregate particle shape influences concrete mixing water requirement and strength. Journal of materials, 2 (1967) 4. s. 843-865.
- /38/ Wright, P. J. F., A method of measuring the surface texture of aggregate. Magazine of concrete research, 7 (1955) 21. s. 151-160.

YHDISTETYN RUNKOAINEEN TYHJÄTILAN MÄÄRITTÄMINEN INTENSIVE COMPACTION -TUTKIMUSLAITTEELLA

Intensive Compaction -laitteella tutkitaan jäykkien betonimassojen tai niiden kaltaisten maamassojen tiivistymistä. Tiivistyminen tapahtuu laitteessa tehokkaalla Intensive Compaction -menetelmällä, jossa massanäytteeseen vaikuttaa puristavia ja leikkaavia voimia. Haluttu tiivistystyö on ennalta tarkoin määrättävissä.

TOIMINTA RUNKOAINEEN TUTKIMUKSESSA

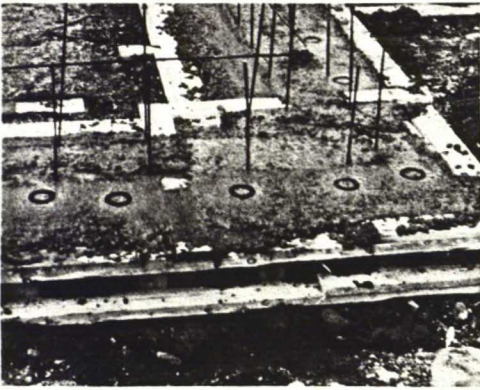
1. Yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakaumaa vastaavat kiviaineslajitteet punnitaan ja sekoitetaan keskenään huolellisesti.
2. Tutkimuslaitteen työsylinteriin punnitaan homogeeninen massanäyte yhdistetystä runkoaineesta.
3. Laitteen ohjausyksikölle annetaan valitut lähtötiedot kuten tiivistyskierrosten lukumäärä.
4. Laite tiivistää yhdistettyä runkoaineseosta sen alaja yläpuolella sijaitsevien puristavien ja pyörivien vinojen ympyrälevyjen välissä.
5. Laite laskee ja tulostaa yhdistetyn runkoaineen tiheyden tiivistyskierrosten funktiona. Kun lisäksi tunnetaan kiviainesten kiintotiheys, voidaan tyhjätilan arvo laskea.



Kuva. Työsylinterin toimintaperiaate.

BETONIN PURISTUSLUJUUDEN IN-SITU-MÄÄRITTÄMINEN BREAK-OFF LAITTEELLA

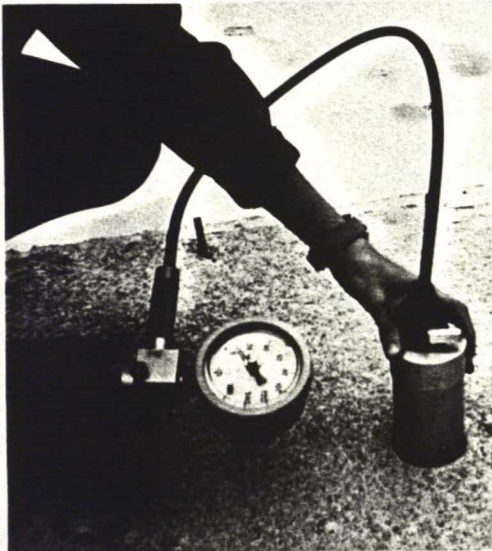
Break-off laite on hydraulinen, osittain ainetta rikkova testauslaite, jonka avulla betonin puristuslujuus voidaan määrittää rakenteesta paikan päällä. Laitteessa on kaksi lujuusaluetta: L-alue alle 30 MPa sekä H-alue alle 70 MPa.



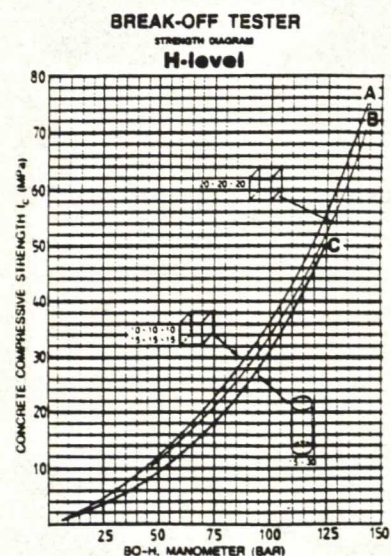
1. Tuoreeseen tasoitettuun betonipintaan asetetaan 5 - 7 kpl muovimuotteja.



2. Muovimuotit poistetaan kovettuneesta betonista erityisellä muottiavaimella.



3. Testauslaitteen kuormitusosa asetetaan koelieriön päälle. Käsikäyttöisellä pumppuosalla pumpataan kuormitusta, kunnes koelieriö katkeaa alaosastaan. Murtumiseen tarvittu paine luetaan mittasteikolta.



4. Käyrästä (joko L- tai H-alue) luetaan painetta vastaava puristuslujuus.

LAB.KOKEET SUHTEITUSTIEDOT VLEISBETONIT K 20 , K 40

Pa 1987

MV

Murske%	vesi- määrä l/m ³	vesi- määrä kg/m ³	lento- tuhka kg/m ³	runko- aine kg/m ³	Paraisten luonnonmuov. % 0-8 mm 8-16 mm 16-32 mm	Karhulan kalliomurske % 0-6 mm 8-16 mm 16-32 mm	runkoaineen läpäisy % # 0.125 # 4 mm	rakeisuus luku H	vesi- sem. suhde					
K 20	0	170	186	105	1878	57	16	27	-	-	5.8	49	491	0.91
	30	170	186	105	1878	56	16	-	28	-	5.7	49	490	0.91
	50	181	185	105	1866	50	-	-	13	6	5.9	49	490	0.98
	70	185	181	102	1819	30	-	-	13	11	6.3	50	491	1.03
	80	199	181	102	1823	20	-	-	19	15	5.9	51	492	1.1
	100	206	178	101	1797	-	-	-	29	25	6.8	52	492	1.16
hienorakeinen	70	185	181	102	1819	30	-	-	27	3	8.6	56	523	1.03
K 40	0	185	293	167	1674	52	10	38	-	-	2.7	44	446	0.63
	50	186	294	168	1681	50	-	-	-	9	2.4	43	443	0.63
	70	186	294	168	1679	30	-	-	5	15	3.2	44	445	0.63
	80	194	293	167	1672	20	-	-	5	25	4	45	450	0.66
	100	204	289	165	1651	-	-	-	12	37	5.8	46	453	0.71
epäjatk.runkoa.	50	185	292	167	1671	53	-	-	-	-	4.5	53	513	0.63
epäjatk.runkoa.	70	194	289	165	1654	30	-	-	23	-	4.7	54	515	0.67
hienorakeinen	70	190	292	166	1669	35	-	-	5	13	5	47	470	0.65

KENTTÄKOKEET
MW 1987

SUITEITUSTIEDOT

Suht. no.	kallio- murske %	vesi- määrä l/m ³	se- määrä kg/m ³	lento- tuhka kg/m ³	runko- aine kg/m ³	Runkoa i n e %				sor- an liete %	runkoaineen läpäisy %	rakeisuus luku H	vesi- se- suhde
						luonnonmuov. filleri	0-8 mm	0-3 mm	3-8 mm	8-18 mm	0.125 # 4 mm		
K 20	1	42	183	83	1907	9	49	-	-	42	5	54	1.26
	2	64	170	84	1948	10	26	-	22	42	5.8	9	42
	3	66	191	87	1906	10	24	-	23	43	5.5	39	478
	4	75	192	81	1898	9	16	12	20	43	3	42	500
K 40	5	0	184	273	1707	-	50	-	-	50	5.8	43	493
	6	50	195	266	1693	-	50	-	-	50	5.2	43	463
	7	65	205	266	154	1674	33	-	15	50	5.8	36	443
	8	65	195	269	155	1695	33	-	15	50	3.8	36	444
epäjätk. rakeinen 12	9	75	187	265	161	1710	-	25	10	15	50	3	457
	10	66	182	255	148	1760	-	34	-	16	50	33	434
	11	46	217	263	152	1627	-	54	-	46	2	2.9	53
	12	65	182	276	158	1732	-	35	10	-	55	2	3.8

kaikki massat notkistettu Parix N:llä annostuksella 0.5 % seementin määrästä (0-4mm)

Suht. no.	kallio- murske %	vesi- määrä l/m ³	se- määrä kg/m ³	lento- tuhka kg/m ³	lisä- aine %	runko- aine kg/m ³	Runkoa i n e %				sor- an liete %	runkoaineen läpäisy %	rakeisuus luku H	vesi- se- suhde
							luonnonmuov. filleri	0-8 mm	0-3 mm	3-8 mm	8-18 mm	0.125 # 4 mm		
K 40 Nest.	13	50	183	276	161	N 2	1717	-	50	-	50	5.5	43	461
	14	69	187	273	159	N 1.5	1721	-	31	-	19	50	33	431
	15	75	172	282	160	N 2	1743	-	25	15	20	40	1.7	4.3
K 40 Hunk.	16	50	178	316	-	H 0.015	1854	3	47	-	50	5.1	43	488
	17	65	166	314	-	H 0.030	1859	3	32	-	15	50	6.1	4.6

N = Nesteytetty MELMENT L10/40:llä
H = Huostotettu PARIX L:llä
kaikki huostotetut massat notkistettu PARIX N:llä 1 % annostuksella seementin määrästä

0.66
0.68
0.61
liian jäykkää

LAB.KOKEET
Pa 1987

YLEISBETONI K 20 , K 40

läh.	murske%	vesi seen.	nassan lämpö- tila	painuma cm	muod.muut aika		vajoama MD	ilmaa- pit. %	tuore- tiheys kg/m3	vedenerottuminen		pur.lujuus		taiv. veto 28d	kovettunais kutistunaa		kuivatiheys kg / m3 7 d	28 d	runkoa. rak.luku H
					svb	svb				1 h ml / 500 ml	3 h	7d	MPa		7 d	56 d			
K 20	0	0.91	25	6.5	1.6		9	1.8	2368	2.7	4.8	21.2	29.7	3.7	0.078	0.303	2380	491	
	30	0.91	26	5	1.9		14	1.9	2355	2.2	4.8	21.8	29.8	3.47	0.069	0.322	2400	490	
	50	0.98	24	7.5	1.6		14	1.3	2355	2.6	6	23.3	32.2	3.53	-	-	2430	490	
	70	1.03	25	5.5	2.2		14	1.3	2335	1.6	5.7	21.6	29	3.52	0.103	0.3	2380	491	
	80	1.1	23	8	1			1.4	2332	2.1	6.1	19.4	27.1	3.54	0.09	0.326	2360	492	
	100	1.15	26	4.8	2.3		15		2319	2.3	3.8	18.1	23.4	2.84	0.063	0.282	2350	492	
K 40	0	0.63	28	7.5	1.5		10	1.8	2357	0.5	0.8	33.6	43.3	4.8	0.185	0.404	2410	2394	446
	50	0.63	26	8.5	1.7		-	1.4	2364	1	1.9	38.2	46.7	5.61	0.111	0.325	2400	2405	443
K 50	70	0.63	23	7.5	2.3		-	1.5	2351	0.5	-	37.1	50.5	5.97	0.186	0.371	2370	2367	445
	80	0.66	23	8.5	1		-	1	2357	0.9	2.9	35.3	48.5	5.88	0.158	0.343	2376	2384	450
	100	0.71	25	7.5	1.7		-	1	2352	1.3	2.5	34.3	42.6	5.19	0.109	0.337	2390	2361	453
	50	0.63	23	7	1.9		-	2	2338	0.8	1.2	38.5	53.9	5.49	0.176	0.41	2321	2364	513
	70	0.67	23	7.5	1.8		-	1.9	2326	0.8	-	36.9	53.4	6	0.178	0.415	2359	2333	515
	70	0.65	22	7.5	2		-	1.5	2345	0.8	1.4	39	52.4	6.29	0.17	0.368	2387	2378	470

KENTTÄKOKEET : KOETULOKSET
 IV 1987

Suht. no.	kallio- murske%	w/c	massan lämpö- tila	painuma cm ennen kulj.& pumpp.	ennen jälkeä kulj.& pumpp.	ilmaa % kuljetus matka km	tuore- tiheys kg/m ³	veden- erott. ml/500ml	normi pur. lujuus 7d 28d	kuivatiheys kg/m ³ 7d 28d	olosuhte- purluj. 7d	Break-off tester (bar)
K 20												
1	42	1.26	15	-	7.5	2.2	2310	2.4	13.1	2330	9.5	81 L
2	64	1.13	16	-	6	1.8	2348	2.1	21.3	2350	14.7	104 L
3	66	1.27	15	-	11.5	1	2350	4	12.3	2410	9.6	56 H
4	75	1.3	16	9	-	1.2	2373	2	14	2370	9.8	88 L
								(2h)				
K 40												
5	0	0.67	-	6	-	1.7	-	-	32.5	43	-	-
6	50	0.73	20	-	9.5	1.7	2306	0.5	29.2	42.2	27.1	62 H
7	65	0.77	19	-	9.5	1.5	2333	0.6	29.8	2370	30.6	74 H
8	65	0.73	-	5	-	-	-	-	40.3	47.8	-	-
9	75	0.71	15	8.5	-	1.4	2354	0.6	32.4	45.7	22.1	92 H
10	66	0.71	-	12	-	-	-	-	28.3	39.5	-	sema. - 20 kg/m ³
11	epä- jatk. 65	0.83	17	10	-	-	2295	-	27.2	32.5	-	-
12		0.66	-	11	-	1.7	2310	-	29.3	42.7	-	-
K 40 nest.												
13	50	0.66	21	20	16	1.1	2355	0.1	32.8	43.2	29.5	72 H
14	69	0.68	14	20	17	1.1	2364	-	35.2	47.7	23.5	89 H
15	75	0.62	-	15	-	0.9	2403	0	36.1	46	-	-
K 40 huok.												
16	50	0.56	16	-	6.5	2.9	2276	0	32	39.4	32	86 H
17	65	0.53	16	9.5	8.5	3.6	2241	0	31.1	36.4	24.8	90 H

LAB.KOKEET SUHTEITUSTIEDOT LISÄAINEBETONIT : Nesteytetty , Huokostettu

Pa 1987
MV

Murske%	lisä- aine- %	vesi- määrä l/m ³	sem. määrä kg/m ³	lento- tuhka kg/m ³	runko- aine kg/m ³	Paraisten luonnonmuov. %			Karhulan kalliomurske %			runkoaineen läpäisy % # 0.125 # 4 mm	rakeisuus luku H	vesi- sem. suhde
						0-8 mm	8-16 mm	16-32 mm	0-3 mm	0-6 mm	8-16 mm	16-32 mm		
K 40	0	N 1.5	186	295	168	52	10	38	-	-	-	-	44	0.64
Nesteytetty	50	N 1.5	186	295	168	50	16	-	-	-	9	41	43	0.64
	70	N 1.5	186	294	168	30	-	-	5	15	9	41	44	0.64
	100	N 5.3	184	291	166	-	-	-	12	37	11	40	46	0.68
K 40 Huokostettu	0	H 0.025	151	315	-	52	10	38	-	-	-	-	44	0.48
	50	H 0.025	151	314	-	50	-	-	-	-	9	41	43	0.48
	70	H 0.025	162	311	-	30	-	-	5	15	9	41	44	0.52
	100	H 0.036	168	312	-	-	-	-	12	37	11	40	46	0.54

N = Nesteytin Melment L10/40

H = Huokostin Paroix L

LAB.KOKKEET LISÄAINEBETONIT : Nesteytetty , Huokostettu
Pa 1987

murske%	vesi- se. suhde	lisää. määrä %	massan lämpö- tila	painuma cm	muod.muut aika svb	ilaa- pit. %	tuore- tiheys kg/m ³	vedenerottuminen		puristuslujuus MPa	taiv. veto 28 d	kovettumis- kutistuma %		kuivatiheys kg / m ³		runkoa. rak.luku H
								1 h	3 h			7 d	56 d	7 d	28 d	
NEST.	0	0.63	1.5	25	19	-	0.7	0.7	1.6	35.5	5.38	0.186	0.409	2358	2370	446
	50	0.63	1.5	22	18	-	0.7	0.7	1	36.7	6.15	0.153	0.359	2379	2349	443
	70	0.63	1.5	20	19	-	0.8	0.8	1.8	36.5	6.1	0.179	0.38	2373	2383	445
	100	0.63	5.3	23	19	-	0	0	0	35.4	6.7	0.219	0.479	2364	2385	453
HUOK.	0	0.48	0.025	22	7	1	2283	0	0	32.8	4.66	0.184	0.399	2300	2320	446
	50	0.48	0.025	21	7	1.1	2282	0	0	32	4.58	0.14	0.362	2300	2310	443
	70	0.52	0.025	22	8	1	2270	0	0	30	4.38	0.154	0.42	2280	2267	445
	100	0.54	0.036	21	7	1.2	2282	0	0	26.8	3.79	0.163	0.536	2300	2280	453

Vesa Puuttala

Taattu tutkimustyötä
Antaa vastustajan tavalliseen
Hyvä viimeistely ja kirjallinen asu
u celi